V. A. VENIKOV
N. D. ANISIMOVA
A. I. DOLGHINOV
D. A. FEDOROV

autoexcitarea și autopendularea în sistemele electrice

EDITURA TEHNICĂ

Scanned with OKEN Scanner

V. A. VENIKOV, N. D. ANISIMOVA
A. I. DOLGHINOV, D. A. FEDOROV

autoexcitarea și autopendularea în sistemele electrice

Traducere din limba rusă

EDITURA TEHNICĂ
BUCUREȘTI - 1967

Scanned with OKEN Scanner

Lucrarea constituie prima încercare de expunere accesibilă, dar riguroasă, a problemelor legate de autoexcitarea şi autopendularea maşinilor sincrone mari, care debitează pe linii de transport lungi, în regimuri normale şi de avarie.

După caracterizarea generală a fenomenelor de autoexcitare şi autopendulare în sistemele electrice, este studiată autoexcitarea şi autopendularea în sistemele simple şi în cele complexe. Sînt examinate condiţiile compensării reactanţei liniilor prin compensatoare, la funcţionarea lor cu sarcini mici, şi înlăturarea autoexcitării motoarelor asincrone conectate la reţea prin condensatoare. Sînt indicate metode practice de calcul al autoexcitării şi autopendulării.

Cartea se adresează inginerilor care lucrează în proiectarea şi exploatarea sistemelor electrice sau a generatoarelor electrice din centrale.

В. А. Веников, Н. Д. Анисимова,
А. И. Долгинов, Д. А. Федоров

Самовозбуждение и самораскачивание в электрических системах

Издательство „Высшая школа"
Москва·1964

Scanned with OKEN Scanner

Prefață

La prima vedere, s-ar părea că problemele autoexcitării și autopendulării cuprind un domeniu destul de îngust, care ar avea o importanță practică limitată. În realitate, situația este cu totul alta. Realizarea sincronizării mașinilor mari, care trebuie să funcționeze pe linii de transport de lungime mare, regimurile normale și de avarie ale acestora în cazul compensării capacitive a reactanțelor inductive ale liniilor, funcționarea cu încărcări reduse — toate sînt legate de aceste probleme. În ultima vreme se extinde folosirea condensatoarelor, pentru compensarea reactanței inductive a generatoarelor și a compensatoarelor sincrone, îndeosebi a celor care funcționează în regimuri speciale (de exemplu la șocuri de sarcină). De foarte multe ori apare necesitatea verificării și a găsirii căilor de evitare a autoexcitării motoarelor asincrone, conectate la rețea prin condensatoare pentru compensarea reactanței lor sau cu condensatoare montate în paralel pentru îmbunătățirea factorului de putere. Îndepărtarea autopendulării are o importanță deosebită pentru instalațiile autonome.

Studierea problemelor de autoexcitare și autopendulare are, pe lîngă importanța practică amintită, și o mare însemnătate metodologică. Pînă de curînd, acestor probleme li se acorda, în facultăți, o importanță secundară. Materialul era răspîndit în diverse cursuri: considerațiile de bază teoretice — în cursurile de baze teoretice ale electrotehnicii; o serie de noțiuni fizice și matematice — în cursurile de mașini electrice; analizarea directă a fenomenelor de autoexcitare și autopendulare — în cursurile de procese tranzitorii în sistemele electrice și de transport al energiei prin linii cu lungime mare. Rolul fenomenelor autoexcitării și autopendulării devenind în prezent mult mai mare decît înainte, considerăm că o carte care dă un cerc mai larg de informații este oportună.

Scanned with OKEN Scanner

Această carte reprezintă prima încercare de expunere sub formă simplă și riguroasă a acestor probleme complicate din punct de vedere fizic și greu accesibile din cauza aparatului matematic complicat. Tematica cercetărilor care au stat la baza cărții a rezultat în urma problemelor ridicate de practica proiectării și exploatării sistemelor energetice. Rezolvarea problemelor de determinare a autoexcitării generatoarelor, în cazul funcționării acestora pe linii lungi și cu sarcini capacitive, studierea autopendulării la sarcini mici, studierea posibilității compensării capacitive au fost începute încă din anul 1948, continuate și approfundate îndeosebi de către autorii acestei lucrări. În lucrare sînt expuse și unele cercetări și calcule efectuate de aspiranți, studenți în ultimul an și colaboratori ai autorilor.

Numărul exemplelor de calcul este redus datorită volumului limitat al cărții. Cititorul poate găsi mai multe exemple în [8].

Autorii speră că această carte va prezenta interes pentru inginerii ce se ocupă cu proiectarea și exploatarea sistemelor electrice.

Autorii

Scanned with OKEN Scanner

Cuprins

Capitolul 1. **Caracteristica generală a fenomenelor de autoexcitare şi autopendulare în sistemele electrice** 9

1.1. Importanţa fenomenelor de autoexcitare şi autopendulare 9
1.2. Esenţa fizică şi metodele de cercetare matematică a autoexcitării 11

Capitolul 2. **Autoexcitarea în sistemul simplu** 28

2.1. Autoexcitarea maşinii sincrone cu poli aparenţi fără înfăşurări de amortizare 28
2.2. Determinarea domeniilor de autoexcitare a maşinii sincrone prevăzute cu înfăşurare de amortizare longitudinală şi transversală 36
2.3. Determinarea zonelor de autoexcitare a maşinilor electrice cu poli înnecaţi (generatoare asincrone, motoare asincrone şi turbogeneratoare sincrone) 44
2.4. Construirea limitelor zonei *III* de autoexcitare asincronă luînd în considerare caracteristicile de frecvenţă ale maşinii sincrone 49
2.5. Eliminarea autoexcitării maşinilor sincrone cu ajutorul regulatoarelor automate de excitaţie 57
2.6. Precizarea caracterului autoexcitării în domeniul $x'_d < x_C < x_q$ 63

Capitolul 3. **Autopendularea în sistemul simplu** 69

3.1. Verificarea la autopendulare a generatoarelor fără înfăşurări de amortizare 69
3.2. Eliminarea autopendulării prin folosirea înfăşurărilor de amortizare 82
3.3. Determinarea valorilor de reglaj ale regulatorului automat de excitaţie folosit pentru eliminarea autopendulării 88

Capitolul 4. **Autoexcitarea în sistemul complex** 102

4.1. Construirea domeniilor de autoexcitare a generatoarelor care funcţionează în sisteme complexe 102

Scanned with OKEN Scanner

4.2. Determinarea domeniilor de autoexcitare a maşinilor sincrone care funcţionează într-o reţea complexă a unui sistem de putere mare 133

Capitolul 5. **Autopendularea în sistemul complex** 138

5.1. Probleme de cercetare 138
5.2. Eliminarea autopendulării maşinilor sincrone care funcţionează în paralel 139
5.3. Autopendularea maşinii sincrone legate printr-o linie de transport de energie cu un sistem receptor de putere comparabilă 152

Capitolul 6. **Exemple de calcul al autoexcitării şi autopendulării** 163

Anexe 175

Bibliografie 189

Scanned with OKEN Scanner

CAPITOLUL 1

Caracteristica generală a fenomenelor de autoexcitare și autopendulare în sistemele electrice

1.1. *Importanța fenomenelor de autoexcitare și autopendulare*

Autoexcitarea și autopendularea sînt două forme ale instabilității regimului de funcționare a mașinilor electrice. *Autoexcitarea*, care reprezintă o instabilitate electromagnetică, apare la un raport determinat între reactanța inductivă a mașinii și reactanța capacitivă conectată la bornele ei. Autoexcitarea se caracterizează prin creșterea arbitrară a curenților și tensiunilor în toate elementele sistemului. Procesul creșterii curenților și tensiunilor decurge fie aperiodic, fie oscilant. Personalul centralelor și stațiilor electrice pierde posibilitatea comandării regimului de funcționare a mașinii ce se autoexcită; la apariția valorilor periculoase de curent și tensiune ce se produc în cursul acestui regim, de obicei mașina trebuie deconectată imediat de la rețea.

În unele cazuri poate apărea în sistemele electrice o perturbare deosebită a stabilității statice, perturbare ce ia naștere la sarcini în centrale cu mult mai mici decît capacitatea de transport a liniilor respective. Acest fenomen este denumit *autopendularea* mașinilor sincrone și se datorește prezenței în sistem a unor rezistențe mari. Autopendularea se dezvoltă ca rezultat al apariției cuplului de amortizare negativ la funcționarea mașinii pe o rețea ce are o rezistență relativ mare și se manifestă sub formă de pendulări ale rotoarelor. Aceste pendulări se pot menține timp îndelungat

Scanned with OKEN Scanner

fără ca mașinile să iasă din sincronism; amplificîndu-se, duc la scoaterea din sincronism a acestora. Condițiile de autopendulare depind esențial de excitația mașinii și de sarcina ei.

Folosirea compensării capacitive longitudinale pe liniile lungi de transport de energie, montarea compensatoarelor sincrone și a bateriilor cu condensatoare, construirea liniilor de transport cu lungimi foarte mari acordate la regimul de semiundă sau executate cu cabluri, măresc probabilitatea apariției autopendulării și autoexcitării mașinilor în sistemele ce conțin acest gen de elemente.

Curenții mari și supratensiunile ce apar la autoexcitare pot provoca defectarea echipamentului sistemului.

Frecvența curentului și tensiunii în cazul autoexcitării mașinilor ce funcționează în sistemele electrice corespunde frecvenței oscilațiilor proprii ale circuitului electric format de mașină și rețeaua exterioară. Această frecvență este de obicei apropiată de cea sincronă.

Condițiile de autoexcitare în mașina nesaturată nu depind practic de excitația mașinii. Regimul ce se stabilește în urma autoexcitării este determinat de saturația și de excitația mașinii.

Fenomenele de autoexcitare și autopendulare pot apărea simultan. De exemplu, mărirea gradului de compensare capacitivă longitudinală poate provoca atît autoexcitare, cît și autopendulare. În felul cum decurg aceste fenomene se observă multe lucruri comune și de aceea esența lor fizică poate fi analizată împreună. Totuși, în practica verificării unui sistem în ce privește lipsa autoexcitării și a autopendulării este bine ca lucrurile de verificare să fie făcute separat.

În cazul cînd constantele de inerție ale rotoarelor mașinilor au valori mari, începutul autoexcitării are loc practic totdeauna la viteză de rotație neschimbată a rotorului. În afară de aceasta, măsurile luate pentru îndepărtarea autoexcitării și autopendulării diferă și cîteodată sînt chiar contradictorii: conectarea unei rezistențe în circuitul statorului poate duce la dispariția autoexcitării, însă simultan stimulează autopendularea; înfășurarea de amortizare transversală elimină practic apariția autopendulării, totuși extinde domeniul autoexcitării asincrone.

Scanned with OKEN Scanner

Autopendularea în sistemele electrice poate fi ușor îndepărtată prin reglarea excitației prin metode obișnuite. Autoexcitarea este îndepărtată mult mai greu. Regulatoarele obișnuite anulează numai unele tipuri de autoexcitare (așa-numita autoexcitare sincronă). Eliminarea completă a autoexcitării poate fi realizată numai cu regulatoare de tip special, care încă nu au fost create și deci nici nu a fost cazul să fi fost aplicate în funcționarea sistemelor electrice.

1.2. *Esența fizică și metodele de cercetare matematică a autoexcitării*

Fenomenul autoexcitării poate apărea într-un sistem în care generatorul (sau generatoarele) formează împreună cu rețeaua electrică un circuit oscilant, la care frecvența de oscilare este apropiată ca valoare de cea de lucru. Prin urmare, pentru dezvoltarea autoexcitării, în sisteme trebuie să existe o capacitate de valoare apreciabilă. În fig. 1.1 este reprezentat cel mai simplu circuit oscilant cu mașină rotativă. O asemenea schemă corespunde în particular funcționării generatorului conectat pe o linie de transport neîncărcată, reprezentată în schemă prin capacitatea C. Circuitul oscilant este format în această schemă de capacitatea și de inductanța mașinii (în care putem considera introduse și inductanțele transformatorului și a liniei).

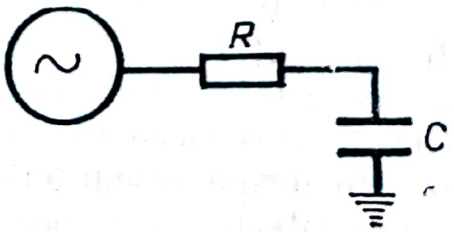


Fig. 1.1. Circuit oscilant „mașină-capacitate".

În circuitul oscilant reprezentat în fig. 1.1, în anumite condiții apar oscilații ce cresc în timp; în acest caz mașina poate să nu fie excitată, fiind necesară numai învîrtirea

rotorului cu o viteză dată, de obicei cea sincronă. Oscilogramele oscilaţiilor de tensiune ce apar pe capacitatea C sînt reprezentate în fig. 1.2. Una din formele procesului de autoexcitare se caracterizează prin aceea că oscilaţiile se

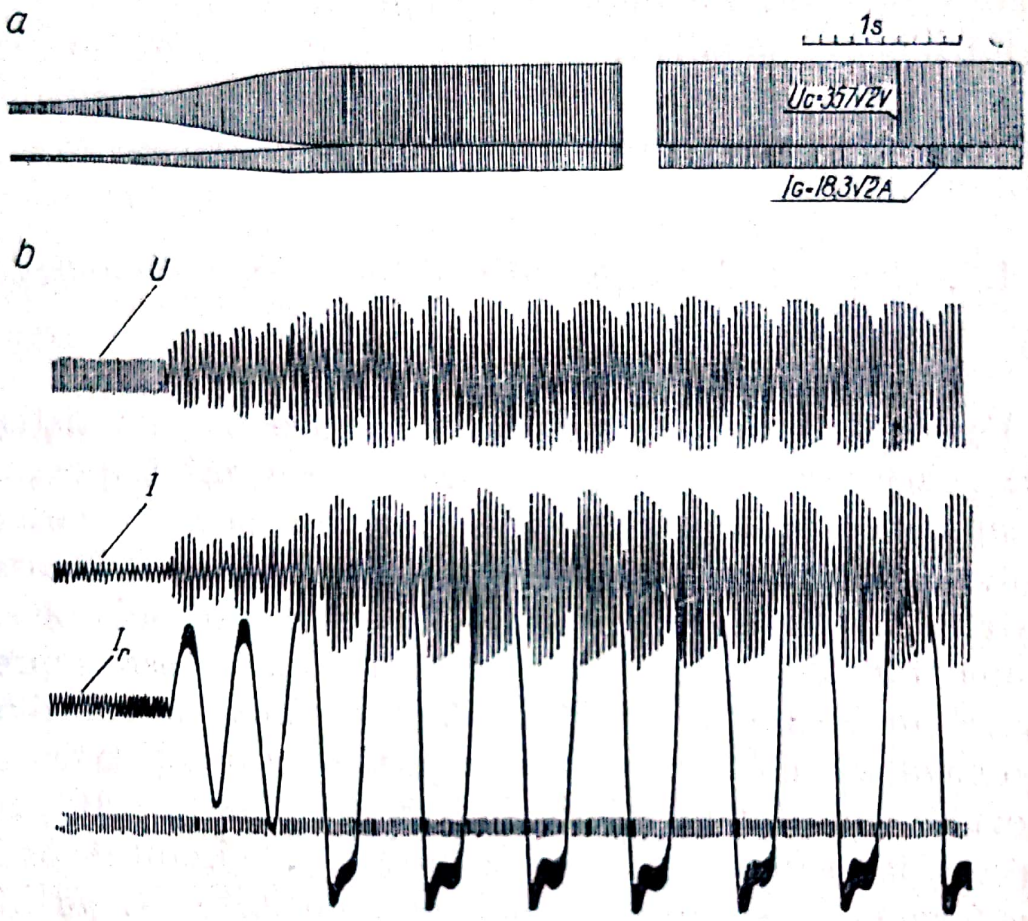


Fig. 1.2. Oscilogramele tensiunii şi curentului în circuitul reprezentat în fig.1. 1:

a — autoexcitarea sincronă; *b* — autoexcitarea asincronă a maşinilor sincrone cu poli aparenţi

dezvoltă la frecvenţă sincronă, iar viteza de creştere a amplitudinii este mică (fig. 1.2, *a*), aceasta este aşa-numita *autoexcitare sincronă*. O altă formă se caracterizează prin viteză mare de creştere a oscilaţiilor; aceasta este aşa-numita *autoexcitare asincronă*.

În regim stabilizat, la autoexcitarea asincronă a maşinilor sincrone, îndeosebi la cele cu poli aparenţi, apare fenomenul de bătăi, a căror perioadă este de ordinul secundelor (fig. 1.2, *b*). La autoexcitarea maşinilor asincrone nu apar bătăi.

La ambele forme de autoexcitare, într-un circuit liniar oscilațiile ar crește nelimitat. Într-un sistem real, această creștere a amplitudinilor oscilațiilor este limitată de obicei de saturația circuitelor magnetice ale mașinilor-generatoare și ale transformatoarelor. Din această cauză, înfășurarea amplitudinilor oscilațiilor (fig. 1.2) tinde spre o limită determinată de saturație.

Trebuie totuși remarcat că creșterea tensiunii poate fi limitată și de o neliniaritate de alt gen — străpungerea izolației. În acest caz, autoexcitarea duce la o avarie în sistem.

Împărțirea autoexcitării în „sincronă" și „asincronă" (fig. 1.2) este corectă cu condiția absenței excitației și în cazul cînd viteza de rotație a rotorului este constantă. Tocmai în asemenea condiții ideale se poate studia acest fenomen în mod simplu. În rețeaua reală, prezența excitării și posibilitatea oscilării rotorului la apariția autoexcitării deformează acest tablou idealizat. În particular, autoexcitarea asincronă se poate transforma în sincronă. Toate aceste particularități vor fi analizate în această lucrare, deși volumul ei redus și cîte o dată cunoașterea insuficientă a fenomenelor nu permit să se dea totdeauna o explicație completă a lor.

Examinînd latura fizică a fenomenului autoexcitării, se face referire în primul rînd la sistemul simplificat reprezentat pentru o singură fază în fig. 1.3: o mașină reactivă (adică o mașină cu poli aparenți, fără înfășurare de excitație) și o capacitate C (fig. 1.3, *a*). Pierderile din circuit sînt reprezentate prin rezistența R. Din punctul de vedere al teoriei circuitelor, acest circuit este oscilant cu inductanță variabilă periodic. La mișcarea rotorului, reactanța fazei înfășurării statorice trifazate variază cu pulsația $2\omega_0$, între limitele x_d (cînd axa ei coincide cu axa rotorului) și x_q (cînd axa fazei este perpendiculară pe axa rotorului) — (fig. 1.3, *b*).

Presupunem că pulsația proprie de oscilație a circuitului este egală cu ω_0 sau aproape de ω_0 și că în circuit apare, datorită unei cauze oarecare, o oscilație a curentului i cu pulsația ω_0, avînd o amplitudine oricît de mică, însă defa-

Scanned with OKEN Scanner

zat în raport cu curba $L(\tau)$, așa cum este reprezentată în fig. 1.4.

Din expresia energiei cîmpului magnetic,

$$W = \frac{Li^2}{2} = \frac{xi^2}{2\omega_0},$$

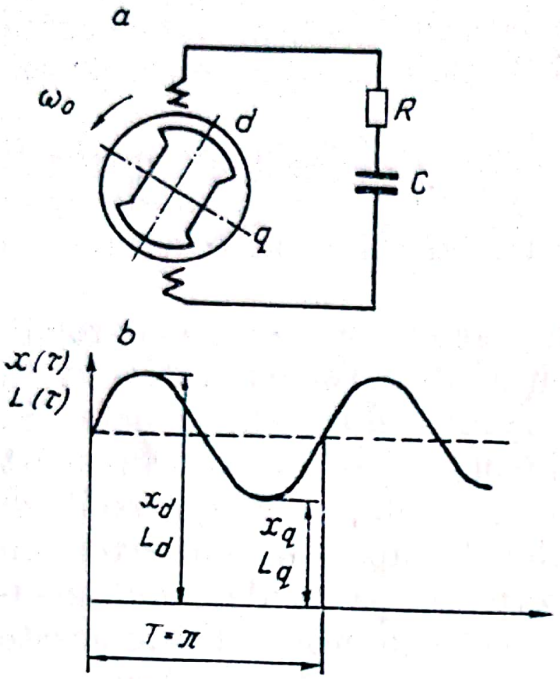


Fig. 1.3. Sistem rezonant cu mașină reactivă:

a — sistemul „mașină reactivă-capacitate";
b — variația inductanței fazei în sistemul reprezentat în fig. 1.3, *a*.

rezultă că pentru variația inductanței străbătute de curentul i este nevoie să se consume energie, care este cedată inductanței, adică pentru variația lui L este nevoie să se aplice un cuplu mecanic la arborele motorului mașinii; cînd L crește cuplul este pozitiv, cînd L scade — negativ. Totuși, așa după cum se vede din fig. 1.4, la decalajul dat al curbelor $i(\tau)$ și $L(\tau)$, pe porțiunea crescătoare a lui $L(\tau)$ curentul este ca valoare absolută mai mare decît pe porțiunile descrescătoare ale lui $L(\tau)$. Deci cuplul mediu la arborele rotorului este mai mare decît zero, întrucît pentru mișcarea rotorului se consumă energie mecanică. Conform legii conservării, această energie trebuie să treacă în energie electromagnetică a circuitului. Dacă puterea corespunzătoare cuplului mecanic la arborele rotorului depășește pierderile de putere în rezistența R a circuitului, curentul din circuit crește de la perioadă la perioadă. Acesta este de fapt tocmai fenomenul autoexcitării în circuitul simplificat (fig. 1.3, *a*).

Din cele expuse se pot trage următoarele concluzii generale referitoare la condițiile de apariție a autoexcitării.

— frecvența oscilațiilor proprii ale circuitului trebuie să fie apropiată de frecvența de rotație a rotorului (în regimul de lucru al sistemului acesta este frecvența sincronă de 50 Hz);

— pierderile în circuit trebuie să fie suficient de mici.

Schema reprezentată în fig. 1.3, *a*, cu o maşină reactivă, este cel mai simplu sistem în care se poate produce autoexci-

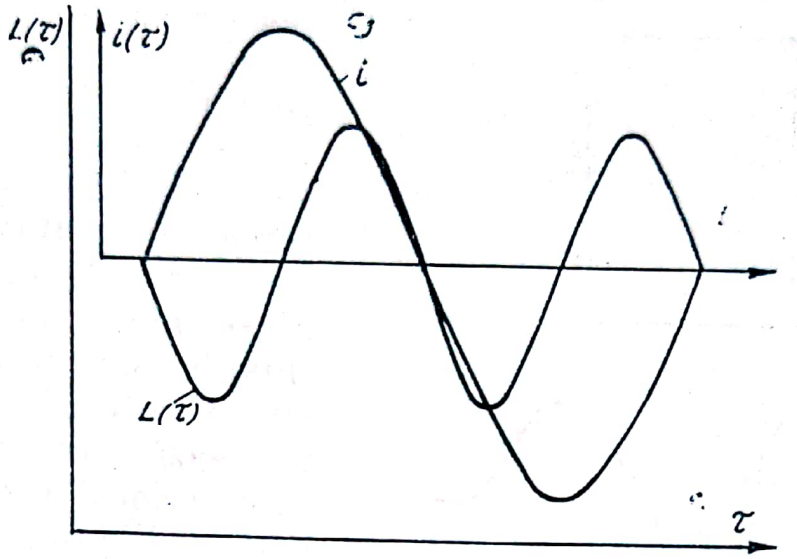


Fig. 1.4. Variaţia curentului şi inductanţei maşinii.

tarea, ca urmare a acţiunii cuplului de reacţie sau cuplului datorit polilor aparenţi.

Acesta se exprimă cu formula

$$M_p = \frac{U^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right).$$

Acest cuplu acţionează totdeauna în maşină. Totuşi, pentru a se declanşa autoexcitarea maşinii, este necesar să fie îndeplinită condiţia de decalaj între curentul i şi inductanţa L (τ) (fig. 1.4). Analiza arată că această condiţie este satisfăcută la o pulsaţie relativă, de oscilaţie a circuitului exterior apropiată de 1 şi în cazul cînd pierderile de putere activă sînt suficient de mici.

În maşinile sincrone, înfăşurarea de excitaţie este închisă pe excitatoare. Deoarece autoexcitarea reprezintă un proces de oscilaţie liberă, în cazul circuitului ideal el se dezvoltă independent de tensiunea excitatoarei şi, prin urmare, înfăşurarea de excitaţie se poate considera scurtcircuitată pe rezistenţa de valoare redusă a excitatoarei (fig. 1.5, *a*).

În circuitul reprezentat în fig. 1.5, *a*, cuplul de reacţie poate fi de două genuri. Dacă curentul din circuitul statoric creşte foarte lent în timpul autoexcitării, în înfăşurarea

de excitație se induce o t.e.m. neglijabilă și fluxul pătrunde liber în circuitul magnetic al rotorului. În acest caz autoexcitarea se dezvoltă la fel ca și la mașina reactivă sub acțiunea cuplului simplu[1]) de reacție.

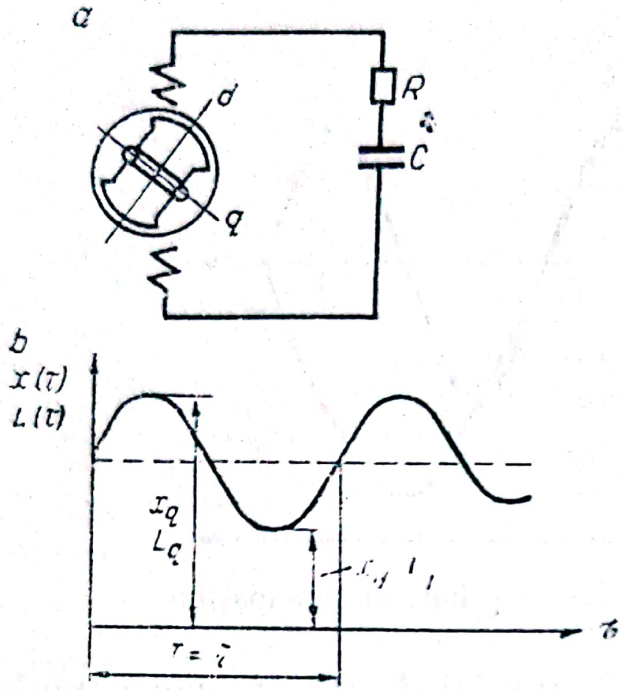


Fig. 1.5. Sistemul rezonant cu mașină sincronă:

a — sistemul „mașină cu poli aparenți avînd înfășurarea de excitație scurtcircuitată — capacitate"; *b* — variația inductanței și reactanței mașinii reprezentate în fig. 1.5, *a*.

Dacă însă curentul din circuitul statoric crește foarte repede în timpul autoexcitării, în înfășurarea de excitație se induce o t. e. m. statică ce se opune pătrunderii fluxului magnetic în circuitul rotorului și care refulează fluxul magnetic în exteriorul acestui circuit, dirijîndu-l pe căile de scăpări (procesul este analog cu cel ce are loc în primul moment la scurtcircuit). În acest caz reactanța inductivă a înfășurării statorului variază în timpul mișcării rotorului între alte limite decît x_d și x_q și anume între limitele x'_d și x_q (fig. 1.5, *b*). Autoexcitarea se dezvoltă ca și la mașina reactivă, însă sub influența cuplului de reacție denumit *dinamic*. Asemenea denumire se justifică prin aceea că acest cuplu poate să acționeze numai în regimul dinamic de creștere cu viteză mare a curentului (și prin urmare și a tuturor celorlalte circuite variabile).

Cuplul simplu de reacție poate apărea numai la mașinile cu poli aparenți (adică la mașinile la care reactanțele inductive x_d și x_q diferă); el nu apare la mașinile cu poli înnecați (la care $x_d = x_q = x$). Deosebit de acesta, cuplul dinamic de reacție poate apărea atît la mașinile cu poli

---

[1]) De obicei termenul de „simplu" nu este întîlnit pentru a desemna cuplul de reacție. Aici l-am introdus însă, deoarece este nevoie să-l deosebim de cuplul de reacție dinamic ce apare în procesele tranzitorii.

aparenți, cît și la cele cu poli înnecați (întrucît atît la unele, cît și la altele $x'_d \neq x_q$). În plus, cuplul dinamic de reacție poate apărea și la mașinile asincrone cu rotorul simetric (fig. 1.6). Într-adevăr, în regimul dinamic, la creșterea curentului din circuitul statoric reactanța inductivă de-a lungul axei ce coincide cu direcția fluxului rezultant este egală cu x', iar de-a lungul direcției transversale, unde barele rotorului nu sînt străbătute de fluxul magnetic, ea este egală cu x. Variația reactanței inductive între limitele x' și x provoacă apariția cuplului dinamic de reacție.

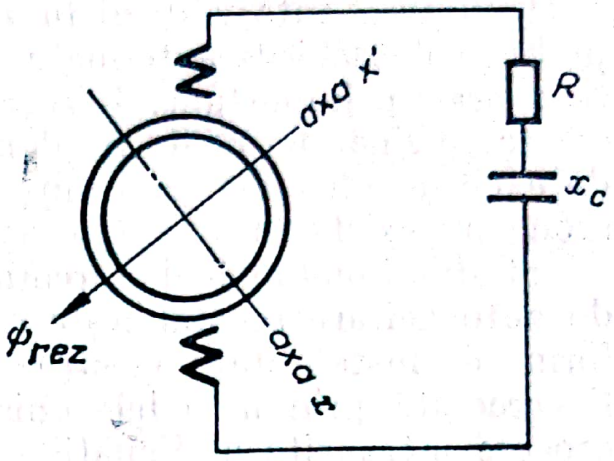


Fig. 1.6. Sistemul „mașină asincronă-capacitate".

Acesta este dat de formula

$$M_p = \frac{U^2}{2}\left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_q}\right).$$

Acțiunea cuplului dinamic de reacție este limitată de saturarea circuitului magnetic al mașinilor. La saturare, curentul și deci fluxul magnetic nu mai cresc repede și t.e.m. statică nu mai poate fi menținută la valoarea respectivă. Oscilațiile ce au apărut în circuit pot fi menținute însă datorită t.e.m. de rotație. În acest caz fluxurile magnetice rezultate, rămînînd neschimbate ca valoare, se rotesc în raport cu rotorul cu o alunecare oarecare s. Puterea disipată în rezistențele circuitului este acoperită în acest caz de către cuplul asincron generator. La mașinile asincrone un asemenea regim poate să se mențină stabil. La mașinile sincrone, așa cum arată analiza, are loc o schimbare periodică a acțiunii cuplului asincron și a cuplului dinamic de reacție care pe oscilograme apare sub formă de bătăi.

Interpretarea fizică a diverselor forme de autoexcitare este reprezentată în fig. 1.2. Autoexcitarea sincronă se datorește acțiunii cuplului simplu de reacție și este posibilă numai la mașinile cu poli aparenți. Autoexcitarea asincronă

se datorește — așa după cum este și denumită — acțiunii cuplului asincron în regim stabilizat; apariția sa este în legătură directă cu cuplul dinamic de reacție. Autoexcitarea asincronă poate să apară atît la mașinile sincrone, cît și la cele asincrone.

Divizarea autoexcitării în sincronă și asincronă mai are, pe lîngă deosebirile exterioare reprezentate în fig. 1.2, și un sens practic important. Esența sa constă în aceea că autoexcitarea sincronă poate fi înlăturată cu regulatorul automat de excitare obișnuit, în timp ce pentru autoexcitarea asincronă nu există încă practic asemenea mijloace simple.

Studiind metodele de cercetare matematică a fenomenului de autoexcitare se stabilește că autoexcitarea reprezintă o formă de instabilitate electromagnetică în sistem, ea putînd fi cercetată prin metodele obișnuite cunoscute din studiul proceselor tranzitorii. Ecuațiile inițiale trebuie să fie complete în sensul că trebuie luate în considerare procesele tranzitorii din circuitul statoric. Pe de altă parte, avînd în vedere viteza mare de creștere a oscilațiilor (cel puțin la autoexcitarea asincronă), există posibilitatea să se considere constantă viteza de rotație a rotorului .Aceste ecuații sînt scrise pentru schema în care mașina neexcitată este închisă pe un circuit exterior pasiv Z, adică fără surse (fig. 1.7). După cum s-a subliniat, această schemă este aplicabilă la studiul oscilațiilor libere dintr-un sistem cu o singură mașină de forma cea mai generală, de exemplu pentru sistemul generator — transformator — linie — bare de putere infinită.

Ecuația fundamentală operațională care leagă fluxul total ψ_a și curentul i_a dintr-o fază oarecare a circuitului statoric are expresia

$$-p\psi_a = Z(p)i_a, \tag{1.1}$$

în care $Z(p)$ este impedanța operațională Z a circuitului.

Exprimăm ψ_a și i_a prin componentele de-a lungul axelor d și q:

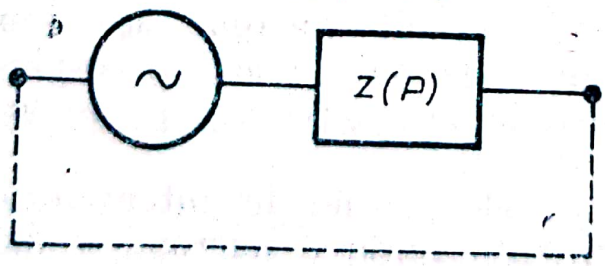


Fig. 1.7. Sistemul „mașină neexcitată-circuit pasiv Z".

$$i_a = i_q \sin\gamma + i_d \cos\gamma;$$
$$\psi_a = \psi_q \sin\gamma + \psi_d \cos\gamma, \tag{1.2}$$

unde unghiul $\gamma = \omega_0 t = \tau$.

Legătura între fluxu-

rile totale și curenți, de-a lungul axelor d și q, este dată de reactanțele operaționale $x_d(p)$ și $x_q(p)$ în care s-a ținut seama de influența curenților tranzitorii în circuitele rotorice :

$$\psi_d = x_d(p)\, i_d; \quad \psi_q = x_q(p)\, i_q. \tag{1.3}$$

Expresiile lui $x_d(p)$ și $x_q(p)$ se cunosc din studiul mașinilor electrice și ale proceselor tranzitorii în sistemele electrice. Pentru mașina sincronă cu circuit de excitație, cu un circuit de amortizare de-a lungul axei transversale, aceste expresii au forma :

$$x_d(p) = x_d - \frac{p^2(x_{11d}x_{afd}^2 - 2x_{f1d}\,x_{a1d}\,x_{afd} + x_{ffd}\,x_{a1d}^2) + p(x_{afd}^2 R_{1d} + x_{a1d}^2 R_{fd})}{p^2(x_{11d}\,x_{ffd} - x_{f1d}^2) + p(x_{11d}R_{fd} + x_{ffd}\,R_{1d}) + R_{1d}R_{fd}}, \tag{1.4}$$

$$x_q(p) = x_q - \frac{p x_{a1q}^2}{p x_{11q} + R_{1q}}. \tag{1.5}$$

Efectul de amortizare al mașinilor care au rotorul masiv (turbogeneratoare) se datorește apariției curenților în numeroasele circuite închise în rotor. Deducerea expresiilor generale pentru $x_d(p)$ și $x_q(p)$ este dificilă în acest caz. Este indicat ca atît pentru aceste mașini, cît și pentru mașinile cu poli aparenți (hidrogeneratoare) să se folosească caracteristicile de frecvență $x_d(j\omega)$ și $x_q(j\omega)$ care leagă fluxul total și curentul, la variația de la 0 pînă la ∞ a pulsației ω din circuitele rotorului :

$$\left.\begin{aligned} \dot{\psi}_d &= x_d(j\omega)\,\dot{I}_d; \\ \dot{\psi}_q &= x_q(j\omega)\,\dot{I}_q. \end{aligned}\right\} \tag{1.6}$$

Remarcăm că expresiile $x_d(j\omega)$ și $x_q(j\omega)$ se pot obține din $x_d(p)$ și $x_q(p)$ prin substituția $p = j\omega$.

Folosirea caracteristicilor de frecvență (măsurate sau calculate) ușurează analiza condițiilor de autoexcitare a mașinilor.

Continuînd deducerea ecuațiilor pentru schema reprezentată în fig. 1.7 exprimăm în relațiile (1.2) pe $\sin\gamma$ și $\cos\gamma$ cu ajutorul formulelor lui Euler :

$$\sin\gamma = -j\,\frac{e^{j\tau} - e^{-j\tau}}{2}; \quad \cos\gamma = \frac{e^{j\tau} + e^{-j\tau}}{2}.$$

Scanned with OKEN Scanner

Introducînd expresiile (1.2) și (1.3) în ecuația inițială (1.1) obținem

$$p[e^{j\tau} x_d(p)\, i_d] + Z(p)\,[e^{j\tau}\, i_d] - j\{p[e^{j\tau} x_q(p)\, i_q] + \\ + Z(p)[e^{j\tau}\, i_q]\} + \text{expresia conjugată} = 0. \qquad (1.7)$$

Trecem la domeniul reprezentărilor simbolice ale funcțiilor i_d și i_q din planul complex, punînd $i_d = \dot{I}_d\, e^{p\tau}$ și $i_q = \dot{I}_q e^{p\tau}$. Neglijînd în ecuația (1.7) expresia conjugată (ceea ce corespunde trecerii în domeniul reprezentării simbolice a funcțiilor), diferențiem și integrăm fiecare termen în parte exprimînd $Z(p)$ sub forma unui șir

$$\ldots + a_{-3}p^{-3} + a_{-2}p^{-2} + a_{-1}p^{-1} + a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + a_3 p^3 + \ldots.$$

Ca rezultat, simplificînd cu $e^{j\tau}$, obținem

$$[(p + j)\, x_d(p) + Z(p + j)]\, i_d - \\ j[(p + j)\, x_q(p) + Z(p + j)]\, i_q = 0. \qquad (1.8)$$

Pentru circuitul exterior dat, impedanța operațională $Z(p)$ se poate da sub formă explicită; apoi, separînd părțile reale și imaginară, găsim ecuația circuitului sub forma operațională :

$$\left.\begin{aligned} A(p)i_d + B(p)i_q &= 0, \\ F(p)\, i_d + H(p)i_q &= 0. \end{aligned}\right\} \qquad (1.9)$$

Egalînd cu zero determinantul acestui sistem de ecuații obținem ecuația caracteristică

$$D(p) = A(p)\, H(p) - B(p)\, F(p) = 0, \qquad (1.10)$$

a cărei analiză dă toate concluziile necesare asupra condițiilor și caracterului autoexcitării în stadiul său inițial, cînd putem considera încă circuitul liniar.

Se presupune că este necesar să se deducă ecuația caracteristică pentru circuitul reprezentat în fig. 1.5, *a*, care are o mașină cu poli aparenți și un circuit (de excitație) de-a lungul axei longitudinale.

Scanned with OKEN Scanner

Impedanța operațională a circuitului exterior format din legarea în serie a rezistenței R cu reactanța capacitativă x_C are forma

$$Z(p) = R + \frac{x_C}{p},$$

prin urmare

$$Z(p + j) = R + \frac{x_C}{p + j}.$$

Introducînd pe $Z(p + j)$ în ecuația (1.8) și efectuînd aducerea la același numitor, obținem

$$\left[(p + j)\, x_d(p) + R + \frac{x_C}{p + j}\right] i_d - j\left[(p + j)\, x_q(p) + R + \right.$$

$$\left. + \frac{x_C}{p + j}\right] i_q = \frac{1}{p + j}\{[(-1 + 2jp + p^2)\, x_d(p) +$$

$$+ R(j + p) + x_C]\, i_d - j[(-1 + 2jp + p^2)\, x_q(p) +$$

$$+ R(j + p) + x_C]\, i_q\} = 0.$$

Egalînd cu zero expresiile dintre acolade (separat părțile reală și imaginară), obținem ecuațiile (1.9) pentru circuitul dat:

$$[(-1 + p^2)\, x_d(p) + p\, R + x_C]\, i_d + [2p x_q(p) + pR]\, i_q = 0 \tag{1.9a}$$

$$[-2p x_d(p) - R]\, i_d + [(-1 + p^2)\, x_q(p) + pR + x_C]\, i_q = 0.$$

Egalînd cu zero determinantul de la numitor al acestui sistem găsim ecuația caracteristică (1.10). Totuși, pentru analiza ei trebuie să se expliciteze expresiile $x_d(p)$ și $x_q(p)$. Pentru mașina sincronă cu un singur circuit pe rotor, aceste expresii, conform relațiilor (1.4) și 1.5), au forma:

$$\left.\begin{aligned} x_d(p) &= \frac{p x_d' T_{d0} + x_d}{p T_{d0} + 1}; \\ x_q(p) &= x_q. \end{aligned}\right\} \tag{1.11}$$

Introducînd aceste expresii în ecuațiile (1.9a) se desfac parantezele și se calculează determinantul

$D(p)=A(p)\,H(p)-B(p)\,F(p)=0$. Punînd rezultatul obținut sub forma unui polinom de puteri, obținem expresia (2.6).

Exemplul analizat arată metoda de deducere a ecuației caracteristice pentru sistemul de tipul celui reprezentat în fig. 1.7. Această metodă nu diferă în principiu de cea studiată la procesele tranzitorii. Totuși, ea este dedusă special pentru problema particulară — cercetarea autoexcitării în sisteme electrice.

După ce s-a dedus ecuația caracteristică, analizînd-o, se obțin condițiile de instabilitate ale sistemului. Întrucît în ecuațiile inițiale nu s-a introdus ecuația cuplurilor, se poate vorbi numai de instabilitatea electromagnetică, adică de autoexcitare.

La analiza proceselor tranzitorii putem aprecia stabilitatea sau instabilitatea sistemului dat, folosind criteriile algebrice ale lui Hurvitz sau Routh [1]. O altă cale este aceea a folosirii metodei frecvențelor de analiză a stabilității.

În ecuația caracteristică se înlocuiește $p = j\omega$ corespunzătoare amplasării rădăcinii pe frontiera de stabilitate. Pentru sistemul dat se poate construi hodograful lui Mihailov, dacă se cunoaște gradul ecuației caracteristice. De regulă, se pune problema construirii domeniilor de autoexcitare (de instabilitate) în funcție de unii parametri ai circuitului de obicei doi. Pentru circuitul simplificat reprezentat în fig. 1.3, *a*, acești parametri pot fi considerați R și x_C. La analizarea problemei se folosește metoda divizării sau se aplică repetat metoda Routh. Ultimul procedeu este folosit de obicei în cazul cînd se utilizează mașini electronice de calcul.

Metoda frecvențelor de construire a domeniilor de autoexcitare dă posibilitatea deducerii directe a zonei de instabilitate aperiodică, corespunzătoare rădăcinii $p = 0$ ($\omega = 0$) și a instabilității oscilante, corespunzătoare rădăcinii $p = j\omega$ ($\omega > 0$). Pentru prima zonă este caracteristică creșterea aperiodică a oscilațiilor, pentru a doua — creșterea oscilațiilor cu bătăi. Aceste zone sînt tocmai zonele de autoexcitare sincronă și respectiv asincronă. Prin urmare, clasificarea formelor de autoexcitare adoptată la începutul capitolului are nu numai o justificare practică, dar și o justificare riguros matematică.

Scanned with OKEN Scanner

Deducerea ecuației caracteristice complete de amortizare pentru mașina cu colivie reprezintă o problemă extrem de complexă. De aceea, în practică se utilizează metode simplificate de calcul. Aceste metode se vor analiza în capitolele următoare. Aplicarea în calcule a metodei frecvențelor dă posibilitatea de a se găsi soluția riguroasă pe o cale relativ simplă. După cum s-a menționat, conform acestei metode, trebuie să se facă înlocuirea $p = j\omega$ în ecuația caracteristică. Însă pentru această înlocuire nu este necesar să se aducă ecuația caracteristică sub forma unui polinom de puteri. Se pot forma ecuațiile (1.9) și (1.10) fără să se expliciteze expresiile $x_d(p)$ și $x_q(p)$ și apoi să se facă schimbarea $p = j\omega$. În acest fel s-a dedus ecuația (1.9 a) în exemplul de mai sus. Introducînd $p = j\omega$ în (1.9 a) se deduce determinantul ecuației sub formă complexă

$$A(j\omega)\,H(j\omega) - B(j\omega)\,F(j\omega) = 0. \qquad (1.12)$$

Separînd părțile reală și imaginară, aducem această ecuație la formele

$$M(\omega) - jN(\omega) = 0, \qquad (1.13a)$$

sau

$$M(\omega) = 0; \quad N(\omega) = 0. \qquad (1.13b)$$

Din aceste ecuații se poate deduce valoarea ω a oricărui alt parametru al circuitului la limita de stabilitate. Pentru circuitul dat, stabilitatea este analizată după principiul succesiunii rădăcinilor ecuațiilor $M(\omega) = 0$ și $N(\omega) = 0$.

Pentru a se evita greșelile, trebuie avut în vedere ca înlocuirea $p = j\omega$ să se facă numai în ecuația (1.9), obținută la rîndul ei din ecuația (1.8) prin separarea părților reală și imaginară. Înlocuirea directă $p = j\omega$ în ecuațiile inițiale duce la o altă metodă de calcul.

1.3. *Esența fizică și metodele de cercetare matematică a autopendulării*

Autopendularea se manifestă sub forma unor oscilații ale rotorului generatorului, care cresc în timp, generatorul funcționînd în paralel cu rețeaua. Aceste oscilații cresc pînă

Scanned with OKEN Scanner

în momentul cînd generatorul iese din sincronism. Pentru apariția autopendulării sînt necesare o serie de condiții care se întîlnesc relativ rar în practică, dar care, totuși, sînt posibile în sistemele de putere mică sau la liniile de transport cu lungimi foarte mari.

Înțelegerea naturii fizice a autopendulării se bazează pe ipoteza naturii parametrice a acestui fenomen. Această ipoteză este justificată de faptul că, aparent, oscilațiile din sistem apar și se dezvoltă „de la sine".

Caracterul parametric al fenomenului presupune că are loc o variație a parametrului sistemului cu o frecvență dublă în raport cu frecvența de oscilație.

Evoluția simplificată a procesului poate fi reprezentată presupunînd că rotorul mașinii excitate (fig. 1.8) începe să penduleze datorită unui impuls oarecare, cu o pulsație oarecare Ω. Perioada acestor pendulări se măsoară în secunde. După cum s-a menționat, inductanța fazei statorului variază, la învîrtirea rotorului, cu o turație de două ori mai mare decît cea sincronă, între limitele $x_d' - x_q$ (pentru mașini cu înfășurarea de excitație închisă pe o rezistență mică, fără colivie de amortizare). În afară de aceasta, pendularea rotorului generatorului duce la oscilarea inductanței fazei statorului cu pulsația 2Ω. Ca rezultat, curba $L(\tau)$ are forma reprezentată în fig. 1.9.

Oscilarea inductanței $L(\tau)$ cu pulsația dublă de sincronism provoacă apariția unui cuplu de reacție care la viteza dată constantă de rotație a rotorului și la îndeplinirea condițiilor pentru crearea unui cuplu generator (frecvența proprie de oscilație a circuitului exterior să fie apropiată de valoarea 1,

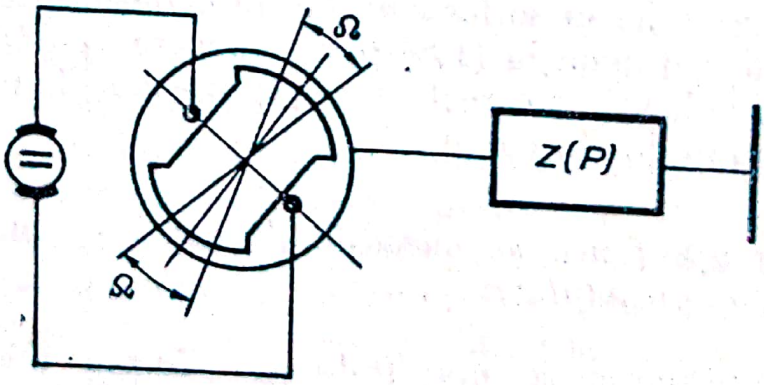


Fig. 1.8. Sistemul „mașină sincronă excitată — circuit exterior".

pierderi mici) excită în circuit oscilații electromagnetice crescătoare în timp. Un efect analog poate excita și oscilarea inductanței $L(\tau)$ cu pulsația $2\,\Omega$. În urma pendulării rotorului cu pulsația Ω, sub acțiunea diferenței între t.e.m. a gene-

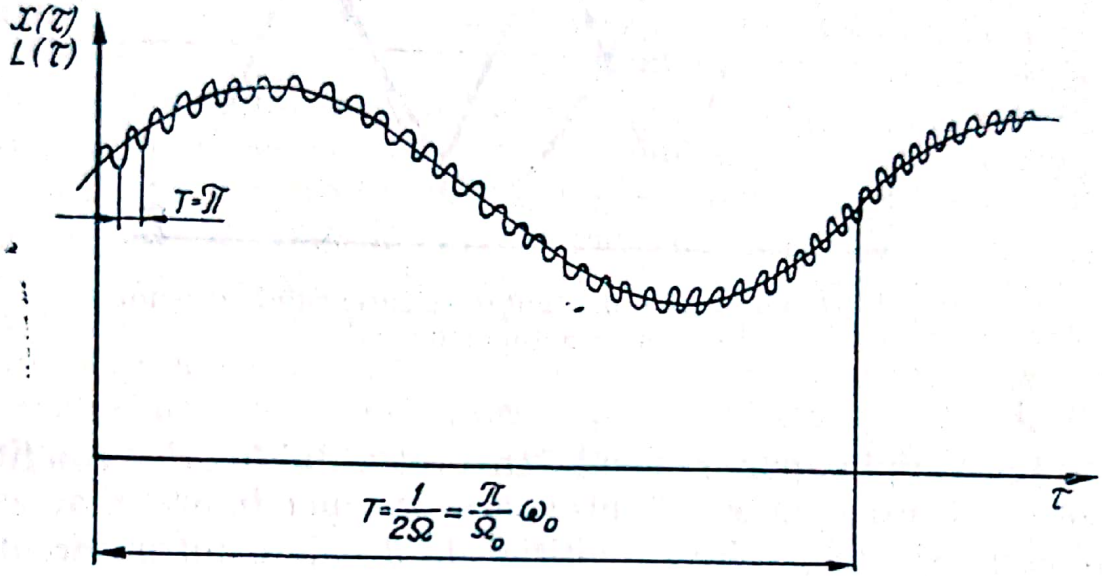


Fig. 1.9. Variația inductanței și reactanței fazei unei mașini în timpul autopendulării.

ratorului și cea a sistemului, prin circuitul statorului trece curentul de pendulare i_k cu pulsația Ω. Se presupune că curbele i_k și $L\ (\tau)_\Omega$ sînt decalate așa cum sînt reprezentate în fig. 1.10. Raționamentul se face apoi ca și mai înainte : pentru varierea inductanței $L(\tau)_\Omega$, străbătură de curentul i_k, este nevoie să se aplice un cuplu mecanic pe arborele rotorului; la creșterea lui L, cuplul este pozitiv și la micșorarea lui L este negativ. Însă, acum, spre deosebire de fig. 1.4, pe porțiunile de creștere ale lui L curentul este mai mic ca valoare absolută decît pe porțiunile de scădere ale lui L. Acest lucru înseamnă că cuplul mediu la arborele rotorului este mai mic decît zero, adică este un cuplu motor. Acest cuplu duce la creșterea amplitudinii de pendulare a rotorului, care la rîndul ei duce la mărirea curentului i_k și așa mai departe. Apare astfel autopendularea.

Cuplul care acționează rotorul la autopendulare este

$$M_k = \frac{U^2}{2}\left[\frac{1}{x_d(j\Omega)} = \frac{1}{x_q(j\Omega)}\right]. \qquad (1.14)$$

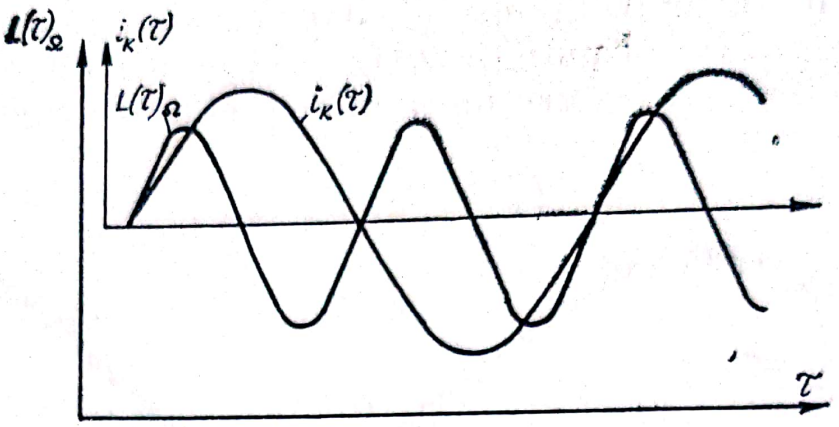


Fig. 1.10. Variaţia inductanţei şi curentului maşinii în timpul autopendulării.

Acest cuplu apare la pendularea rotorului în orice condiţii. Totuşi, pentru ca el să provoace autopendulare mai este necesară şi îndeplinirea condiţiei de decalare între curentul i_k şi inductanţa $L(\tau)_\Omega$, aşa cum se arată în fig. 1.10. Analiza arată că această condiţie este satisfăcută dacă rezistenţe circuitului exterior depăşeşte o valoare oarecare R_{Cr}.

Aşadar, autopendularea este de natură parametrică şi se datoreşte diferenţei între reactanţele inductive de-a lungul axelor longitudinală şi transversală. Apropiind ca valoare pe $x_q(j\Omega)$, de $x_d(j\Omega)$, prin prevederea de circuite de amortizare de-a lungul axei transversale, se poate micşora pericolul de autopendulare. Tendinţa spre autopendulare este accentuată şi la creşterea excitaţiei.

Tendinţa spre autopendulare o au sistemele cu rezistenţă mare în circuitul statoric, de exemplu sistemele de putere mică cu linii de secţiuni mici. Raportul mare între rezistenţă şi impedanţă poate fi întîlnit şi la liniile de transport de energie cu compensare longitudinală. La aceste sisteme este posibilă apariţia simultană a autoexcitării şi autopendulării. Este posibil, de asemenea, ca în timpul autopendulării să apară şi autoexcitarea datorită abaterii frecvenţei de rotaţie a rotorului faţă de cea de sincronism.

Astfel, se poate răspunde la problema pusă la începutul capitolului 1 și explica justețea studierii în paralel a fenomenelor de autoexcitare și autopendulare. Acest lucru este posibil în primul rînd datorită caracterului comun al esenței fizice a ambelor fenomene și, în al doilea rînd, datorită caracterului comun al manifestării lor în sistemele oscilante.

Pe de altă parte, este recomandabil să se separe cercetarea analitică a fenomenelor de autoexcitare și autopendulare, chiar și în acele cazuri cînd ele apar simultan. Această posibilitate se datorește diferenței radicale între frecvențele oscilațiilor ce apar în cazurile respective (v. fig. 1.9), motiv pentru care condițiile de apariție a autoexcitării pot fi studiate la viteza dată de rotație a rotorului. În plus, la studierea autopendulării se admite să nu fie luate cîte o dată în considerare procesele tranzitorii din circuitele statorului, care au loc într-un timp scurt în comparație cu perioada de pendulare a rotorului.

Caracteristicile fizice expuse arată calea care trebuie urmată la cercetarea matematică a fenomenelor de autopendulare. La baza cercetării trebuie să stea ecuațiile diferențiale ale sistemului în care se ține seama și de ecuațiile cuplurilor ce acționează pe arborele rotoarelor mașinii. Pentru circuitele statorice, în acest caz, ecuațiile pot fi scrise sub formă simplificată, prin neglijarea proceselor tranzitorii electromagnetice.

Scanned with OKEN Scanner

C A P I T O L U L 2

Autoexcitarea în sistemul simplu

2.1. *Autoexcitarea maşinii sincrone cu poli aparenţi fără înfăşurări de amortizare*

Maşina sincronă care funcţionează pe o sarcină capacitivă formează un sistem oscilant cu inductanţa fazelor maşinii variabilă periodic. Într-un asemenea sistem oscilant, la un anumit raport între parametrii maşinii şi sarcina capacitivă, apar oscilaţii libere a căror amplitudine creşte nelimitat, dacă nu se ţine seama de neliniaritatea sistemului. Practic, din cauza saturaţiei fierului, amplitudinea oscilaţiei libere este limitată, putînd totuşi atinge valori periculoase. Pentru acest lucru nu este nevoie ca, la apariţia autoexcitării, maşina să fie excitată, iar pentru crearea impulsului iniţial este suficientă prezenţa numai a magnetismului remanent al fierului maşinii.

În procesul de proiectare şi exploatare a sistemelor electrice este important să se cunoască raportul dintre parametrii circuitului maşină-sarcină capacitivă la care apare autoexcitarea. Pentru o maşină sincronă cu poli aparenţi nesaturată, care funcţionează la bare de tensiune neschimbată prin reactanţa capacitivă x_C, reactanţa inductivă exterioară x_{ex} şi rezistenţa R (fig. 2.1), se pot scrie următoarele ecuaţii diferenţiale[1]):

[1]) Ecuaţii analoge se întîlnesc la scurtcircuite după capacitate. În acest caz, tensiunile U_d şi U_q depind de felul scurtcircuitului; astfel, la scurtcircuite trifazate $U = 0$, adică $U_d = U_q = 0$.

$$\left.\begin{aligned} &p(U_d + p\psi_d + p\gamma\psi_q + i_d R) + x_C i_d = -p\gamma(U_q + \\ &\qquad + p\psi_q - p\gamma\psi_d + R i_q); \\ &p(U_q + p\psi_q - p\gamma\psi_d + i_q R) + x_C i_q = p\gamma(U_d + \\ &\qquad + p\psi_d + p\gamma\psi_q + i_d R). \end{aligned}\right\} \quad (2.1)$$

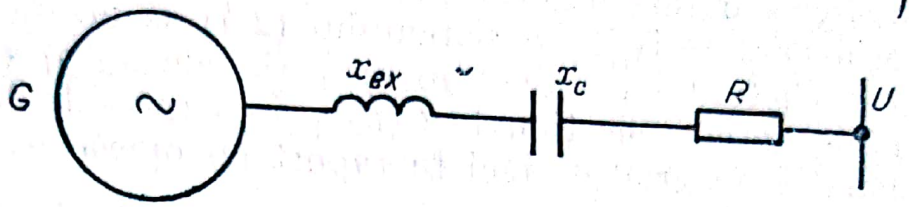


Fig. 2.1. Sistemul „maşină sincronă cu poli aparenţi-capacitate-bare de tensiune constantă".

Fluxurile totale ale înfăşurărilor statorului pot fi exprimate prin ecuaţiile [1]:

$$\left.\begin{aligned} \psi_d &= G(p)\, U_{fd} + x_d(p)\, i_d; \\ \psi_q &= x_q(p)\, i_q. \end{aligned}\right\} \quad (2.2)$$

Pentru maşinile fără înfăşurare de amortizare rectanţele operaţionale[2] $x_d(p)$ şi $x_q(p)$ şi conductanţa operaţională au forma:

$$\left.\begin{aligned} x_d(p) &= \frac{p x'_d T_{d0} + x_d}{p T_{d0} + 1}; \\ x_q(p) &= x_q; \\ G(p) &= \frac{1}{p T_{d0} + 1} \frac{x_{afd}}{R_{fd}}. \end{aligned}\right\} \quad (2.3)$$

Considerînd că excitaţia maşinii este constantă, adică $U_{fd} = \text{const}$ şi că viteza de rotaţie a rotorului $p\gamma = 1$, obţinem sistemul de ecuaţii liniare diferenţiale neomogene:

$$\begin{aligned} &i_d[x_d(p) - p^2 x_d(p) - pR - x_C] - i_q[2p x_q(p) + R] = \\ &\qquad = U_{fd}[p^2 G(p) - G(p)] + U_q; \qquad (2.4) \\ &-i_d[2p x_d(p) + R] + i_q[p^2 x_q(p) - x_q(p) + pR + x_C] = \\ &\qquad = 2pG(p)\, U_{fd} + U_d. \end{aligned}$$

[1]) Reactanţa inductivă externă x_{ex} este introdusă în reactanţele maşinii x_d, x_q şi x'_d.

[2]) Vezi expresia (1.11).

Integrarea sistemului de ecuații (2.4) în raport cu variabilele i_d și i_q dă :

$$i_d(p) = \frac{D_1(p)}{D(p)}; \qquad i_q(p) = \frac{D_2(p)}{D(p)}, \tag{2.5}$$

unde $D(p)$ este determinantul sistemului.

Ecuația caracteristică a sistemului (2.4) se obține după înlocuirea reactanțelor inductive operaționale $x_d(p)$ și $x_q(p)$ și a conductanței operaționale $G(p)$ prin expresiile lor; ea este o ecuație de gradul cinci în raport cu operatorul p.

$$a_0p^5 + a_1p^4 + a_2p^3 + a_3p^2 + a_4p + a_5 = 0. \tag{2.6}$$

Coeficienții ecuației (2.6) se determină din parametrii sistemului în felul următor :

$$\left.\begin{aligned}
a_0 &= T_{d0}\, x_q x'_d;\\
a_1 &= T_{d0}\, R(x_q + x'_d) + x_q x_d;\\
a_2 &= T_{d0}(2x_q x'_d + x_C x'_d + x_q x_C) + T_{d0}\, R^2 + R(x_d + x_q);\\
a_3 &= x_d x_C + x_q x_C + 2\, x_d x_q + R^2 + T_{d0} R\, (2\, x_C + x_q + x'_d);\\
a_4 &= T_{d0}(x_C - x_q)(x_C - x'_d) + T_{d0} R^2 + R(2\, x_C + x_q + x_d);\\
a_5 &= (x_C - x_d)(x_C - x_q) + R^2.
\end{aligned}\right\} \tag{2.7}$$

Posibilitatea apariției autoexcitației este legată de existența în ecuația caracteristică (2.6) a rădăcinilor situate în partea dreaptă a planului. Acest lucru are loc dacă nu sînt respectate condițiile Hurvitz, conform cărora, într-un sistem stabil, ultimul termen al ecuației caracteristice (aici $a_5 > 0$), trebuie să fie pozitiv iar penultimul minor (aici Δ_4), format cu coeficienții ecuației (2.6), să fie mare decît zero. Așadar autoexcitarea are loc dacă sînt satisfăcute inegalitățile :

$$a_5 < 0 \text{ sau } \Delta_4 < 0. \tag{2.8}$$

Prima condiție (2.8) presupune existența unei rădăcini reale pozitive pentru ecuația caracteristică a sistemului și determină zona autoexcitării sincrone. Satisfacerea celei de a doua condiții (2.8) corespunde apariției unei perechi de rădăcini complexe conjugate, cu partea reală pozitivă, sau

Scanned with OKEN Scanner

a două rădăcini reale pozitive și caracterizează zona autoexcitării asincrone.

Frontierele zonelor de autoexcitare rezultă din condițiile:

$a_5 = 0$ — pentru zona de autoexcitare sincronă (2.9a);

$\Delta_4 = 0$ — pentru zona de autoexcitare asincronă (2.9b).

Pe frontiera zonei autoexcitării sincrone, ecuația caracteristică are o rădăcină nulă. Zona autoexcitării sincrone, obținută din condiția $a_5 = 0$, în coordonatele R și x_C, este limitată de un semicerc al cărui centru are coordonatele $R = 0$ și $x_C = \frac{x_d + x_q}{2}$. Cercul menționat intersectează axa ordonatelor în punctele $x_C = x_d$ și $x_C = x_q$, adică la rezistențe foarte mici (mai precis pentru $R = 0$), iar zona autoexcitării sincrone este determinată de valorile reactanței capacitive a rețelei exterioare, conform inegalității

$$x_q < x_C < x_d. \tag{2.10}$$

Raza cercului rezultat din ecuația $a_5 = 0$ reprezintă valoarea maximă a rezistenței la care este posibilă apariția autoexcitării sincrone,

$$R_{max} = \frac{x_d - x_q}{2}.$$

La $R > R_{max}$ autoexcitarea sincronă nu apare pentru orice valori ale lui x_C. Limitele zonei I a autoexcitării sincrone (fig. 2.2) nu depind de valoarea constantei de timp T_{d0} a înfășurării de excitație și ne putem aștepta la apariția ei, chiar cînd înfășurarea de excitație este deconectată. În zona I de autoexcitare, viteza de rotație a rotorului este riguros exactă cu viteza de rotație a cîmpului electromagnetic creat de curenții statorului. Oscilațiile curentului și tensiunii statorului în zona I cresc încet (fig. 2.2, a) și pot fi eliminate de dispozitivul de reglare automată a excitației.

Zona autoexcitării de forma $\Delta_4 = 0$ se numește *zona autoexcitării asincrone*, deoarece limita ei este determinată de rădăcina imaginară $p = \pm j\omega$ a ecuației caracteristice, iar felul cum se dezvoltă autoexcitarea demonstrează existența bătăilor specifice oscilațiilor asincrone. La anumite rapoarte între parametrii sistemului, în acest domeniu, viteza de rotație a rotorului nu este egală cu frecvența oscilațiilor

Scanned with OKEN Scanner

din circuitul statorului, adică are loc o deplasare a cîmpului statorului față de rotor, fapt caracteristic regimului asincron. Domeniul din interiorul zonei *II* de autoexcitare asincronă pe frontiera căreia rădăcinile complexe ale ecuației caracteristice devin două rădăcini reale, se numește cîteodată *domeniul autoexcitării repulsivo-sincronă* [1]).

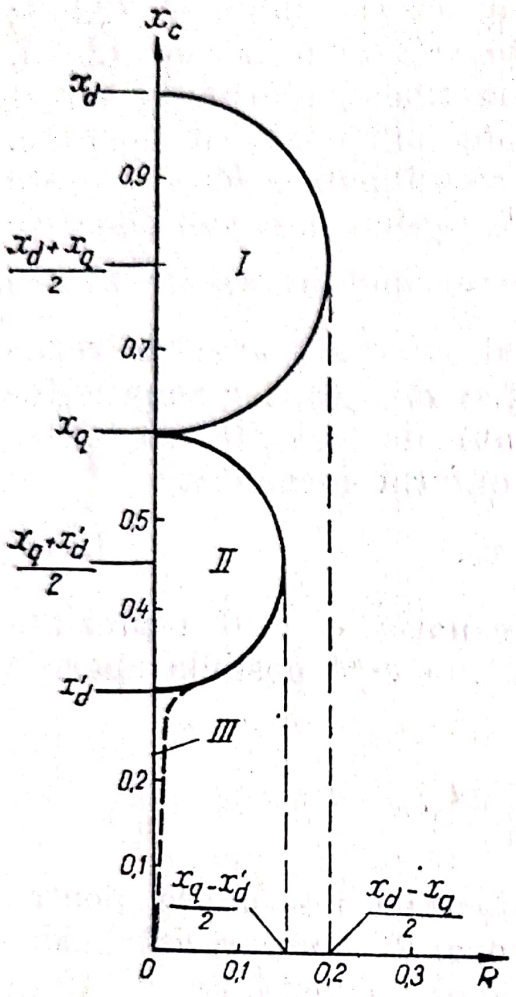


Fig. 2.2. Zonele de autoexcitare a unei mașini sincrone cu poli aparenți fără înfășurări de amortizare.

Construirea zonei *II* a autoexcitării asincrone se poate face cu ajutorul metodei divizării sau după criteriul lui Routh.

Din fig. 2.2 se vede că autoexcitarea asincronă (zonele *II* și *III*) apare în cazul variației reactanței capacitive x_C a rețelei exterioare și pentru valori mici ale lui R care variază de la 0 pînă la x_q.

Pentru mașina fără înfășurări de amortizare, zona *III* a autoexcitării pentru valorile $x_C < x'_d$ este îngustă și limitată de valorile reduse ale rezistenței, situate în domeniul valorilor rezistențelor mașinii sincrone, transformatoarelor, liniei de transport și ale altor elemente. De aceea, zona *III* este neglijată. În acest caz, la proiectare și în calculele din exploatare, frontiera autoexcitării asincrone poate fi determinată aproximativ din condiția de egalare cu zero a coeficientului penultim din ecuația caracteristică [2])

$$a_4 = 0. \tag{2.11}$$

[1]) Metoda găsirii zonei autoexcitării repulsivo—sincronă este dată în subcap. 2.6.

[2]) Prin cifra *II* vom nota zona autoexcitării asincrone găsită din condiția $a_4 = 0$, iar prin cifra *III* — zona autoexcitării asincrone pentru $x'_C < x'_d$ (fig. 2.2).

Zona *II* a autoexcitării asincrone, găsită cu relația (2.11), este limitată de un arc de elipsă ale cărei axe sînt deviate față de axele de coordonate R, x_C cu 45°, iar centrul este deplasat față de axa ordonatelor.

Dacă constanta de timp T_{d0} a înfășurării de excitație reprezintă 3—4 sau mai multe secunde, rotirea elipsei și deplasarea centrului său sînt mici. Se poate considera că zona *II* a autoexcitării asincrone este limitată de asemenea de un semicerc. Raza acestui semicerc este egală cu $\frac{x_q - x'_d}{2}$, iar centrul este situat pe axa x_C la distanța $\frac{x_q + x'_d}{2}$ față de originea axelor. Semicercul intersectează axa ordonatelor în punctele $x_C = x_q$ și $x_C = x'_d$, adică la $R = 0$ zona *II* de autoexcitare asincronă este determinată de inegalitatea (fig. 2.2)

$$x'_d < x_C < x_q. \tag{2.12}$$

Valoarea maximă a rezistenței zonei *II* de autoexcitare asincronă, în cazul cînd constanta de timp a înfășurării de excitație este $T_{d0} > 3 - 4$ s, se determină din condiția

$$R_{max} = \frac{x_q - x'_d}{2}. \tag{2.13}$$

Pentru valori ale constantei T_{d0} de la 3—4 pînă la ~ 1 s rezistența R_{max} este determinată din relația

$$R_{max} = \frac{T_{d0}(2x_q + x_d + x'_d) - \sqrt{(2x_q + x_d + x'_d)^2 - (1 - T_{d0}^2)(x_q - x'_d)^2}}{2(1 - T_{d0}^2)}, \tag{2.14}$$

care s-a obținut din criteriul aproximativ $a_4 = 0$. Din formula (2.14) rezultă că micșorarea constantei de timp duce la scăderea lui R_{max} (fig. 2.3), ceea ce conduce la îngustarea domeniului de autoexcitare asincronă.

Dacă constanta de timp T_{d0} a înfășurării de excitație este mică (sub 1 s), domeniul autoexcitării aflat în limitele $x'_d < x_C < x_q$ se deformează și trebuie să fie determinat cu criteriul exact $\Delta_4 = 0$. În acest caz nu poate fi aplicat criteriul

(2.11) pentru construirea domeniului autoexcitării asincrone. În fig. 2.4 este reprezentată deformarea zonei autoexcitării asincrone în cazul schimbării constantei de timp a înfășurării de excitație.

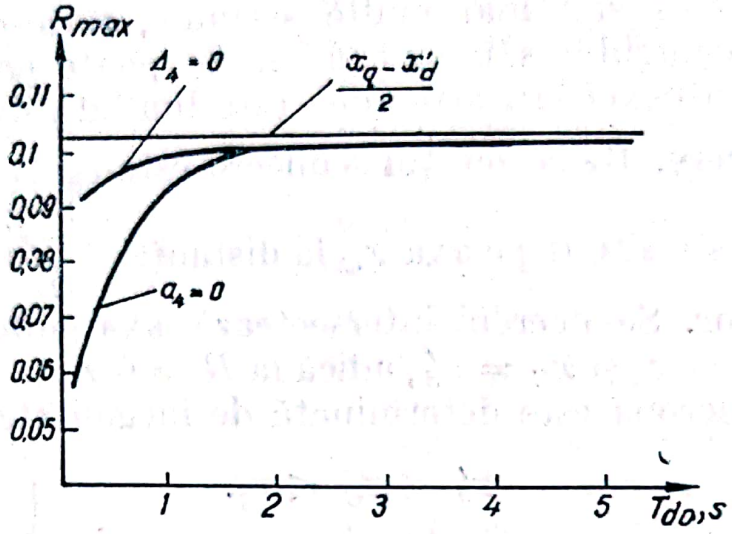


Fig. 2.3. Variația rezistenței maxime a zonei *II* în funcție de cea a constantei de timp T_{d0}.

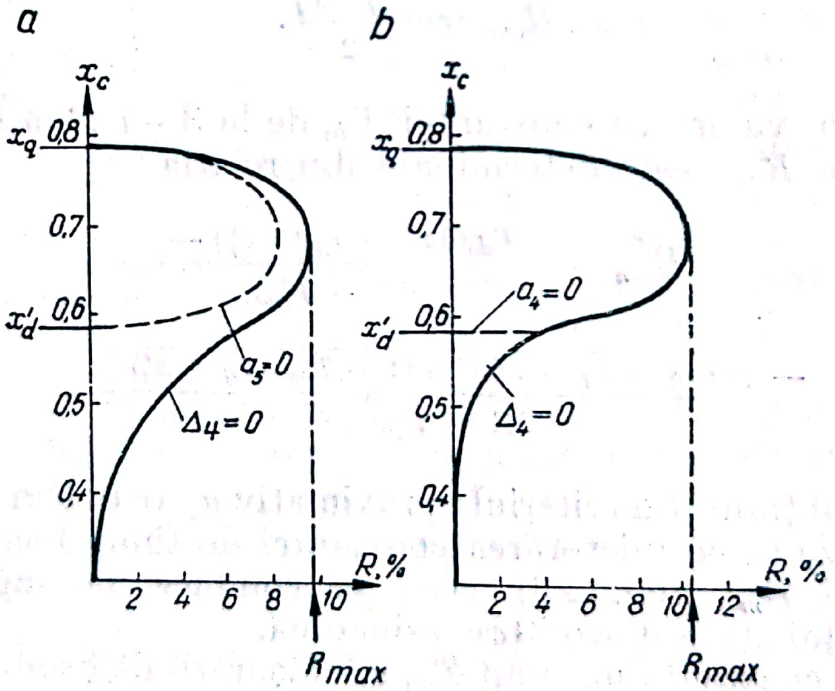


Fig. 2.4. Zona autoexcitării asincrone pentru diverse valori ale constantei de timp T_{d0}:
a — $T_{d0} = 0{,}3$ s; *b* — $T_{d0} = 5$ s.

Valoarea constantei de timp a înfășurării de excitație influențează și valoarea rezistenței din zona *III* a autoexcitării, unde $x_C < x'_d$.

Micșorarea lui T_{d0} duce la lărgirea acestei zone de autoexcitare (fig. 2.5), adică la creșterea lui R. Numai la valori foarte mici pentru T_{d0} relația $R = f(T_{d0})$ își schimbă caracterul și la $T_{d0} = 0$, ceea ce corespunde întreruperii înfășurării de excitație, zona *III* a autoexcitării dispare. Ultima afirmație poate fi justificată prin analiza ecuației caracteristice (2.6), care la $T_{d0} = 0$ se transformă în ecuația de gradul patru

$$x_d x_q p^4 + R(x_d + x_q)p^3 + [(x_d + x_q)\, x_C + 2x_d x_q + R^2]\, p^2 + R(x_d + x_q + 2x_C)\, p + (x_C - x_d)(x_C - x_q) + R^2 = 0. \quad (2.15)$$

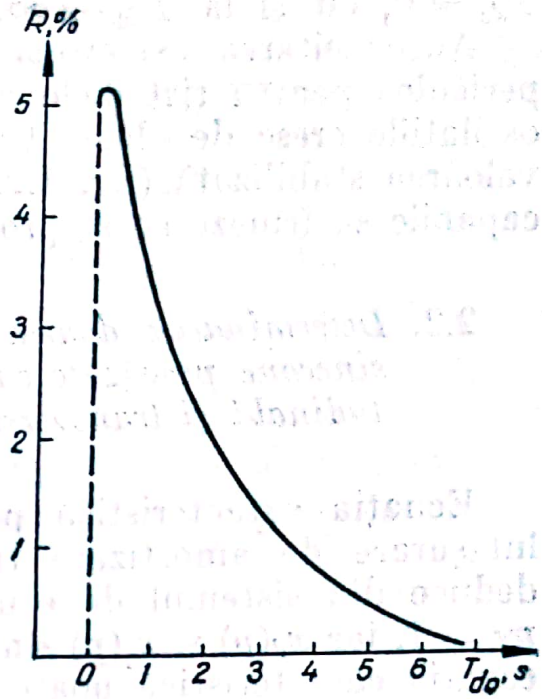


Fig. 2.5. Variația frontierei zonei *III* la diverse valori ale constantei de timp T_{d0} ($x_C = 0{,}95x'_d$).

Din (2.15) reiese că la $T_{d0} = 0$ este posibilă numai autoexcitarea sincronă între limitele $x_q < x_C < x_d$, dar zona de autoexcitare asincronă dispare complet.

La $T_{d0} \to \infty$ (circuit supraconductor al rotorului) ecuația caracteristică se transformă de asemenea în ecuație de gradul patru și are expresia

$$x_q x'_d p^4 + R(x_q + x'_d)\, p^3 + [(x_q + x'_d)\, x_C + 2x_q x'_d + R^2]p^2 + R(2x_C + x_q + x'_d)p + (x_C - x'_d)\,(x_C - x_q) + R^2 = 0. \quad (2.16)$$

În acest caz există numai zona autoexcitării asincrone între limitele

$$x'_d < x_C < x_q.$$

Acest domeniu este delimitat de un semicerc cu raza $\frac{x_q - x'_d}{2}$.

Aşadar zona *III* de autoexcitare asincronă ($x_C < x'_d$) dispare atît în cazul cînd înfăşurarea de excitaţie este întreruptă, cît şi în cazul cînd ea reprezintă un circuit supraconductor. Acest fapt este reprezentat în fig. 2.5 unde $R = 0$ atît la $T_{d0} = 0$, cît şi la $T_{d0} \to \infty$.

Autoexcitarea asincronă reprezintă fenomenul cel mai periculos pentru sistemele electrice, deoarece în acest caz, oscilaţiile cresc de obicei timp de cîteva perioade, pînă la valoarea stabilizată (fig. 1.2, *b*), iar RAT existente nu sînt capabile să frîneze acest proces ce se dezvoltă foarte rapid.

2.2. *Determinarea domeniilor de autoexcitare a maşinii sincrone prevăzute cu înfăşurare de amortizare longitudinală şi transversală*

Ecuaţia caracteristică pentru maşina ce are pe rotor înfăşurare de amortizare transversală şi longitudinală se deduce din sistemul de ecuaţii (2.1). Dacă considerăm că $p\gamma = 1$, iar $x_d(p)$ şi $x_q(p)$ sînt date de expresiile (1.4) şi (1.5), ecuaţia caracteristică poate fi pusă sub forma următorului polinom.

$$a_0p^7 + a_1p^6 + a_2p^5 + a_3p^4 + a_4p^3 + a_5p^2 + a_6p + a_7 = 0. \tag{2.17}$$

Coeficienţii ecuaţiei (2.17) au expresiile:

$$a_0 = T_{d0}T_QT_2x''_q x''_d;$$

$$a_1 = T_{d0}T_QT_2R(x''_q + x''_d) + T_{d0}T_Qx'_dx''_q + T_DT_Qx''_q x_1 + T_{d0}T_2x_dx''_d;$$

$$a_2 = T_{d0}T_QT_2(x_Cx''_d + x_Cx''_q + 2x''_q x''_d + R^2) + T_{d0}T_QR(x''_q + x'_d) + T_{d0}T_2R(x''_d + x_q) + T_QT_DR(x''_q + x_1) + T_{d0}x_qx'_d + T_Qx_dx''_q + T_Dx_qx_1;$$

$$a_3 = T_{d0}T_QT_2R(x''_d + x''_q + 2x_C) + T_{d0}T_Q(x_Cx'_d + x_Cx''_q + 2x'_dx''_q + R^2) + T_{d0}T_2(x_Cx''_d + 2x_qx''_d + x_qx_C + R^2) + T_QT_D(x_Cx''_q + x_Cx_1 + 2x''_q x_1 + R^2) + T_{d0}R(x_q + x'_d) + T_DR(x_q + x_1) + T_QR(x_d + x''_q) + x_dx_q;$$

$$a_4 = T_{d0}T_QT_2(x''_q - x_C)(x''_d - x_C) + T_{d0}T_QT_2R^2 +$$
$$+ T_{d0}T_QR(x''_q + x'_d + 2x_C) + T_{d0}T_2R(x_q + x''_d +$$
$$+ 2x_C) + T_QT_DR(x''_q + x_1 + 2x_C) + T_{d0}(x_Cx'_d +$$
$$+ x_qx_C + 2x_qx'_d + R^2) + T_D(x_qx_C + x_1x_C + 2x_1x_q +$$
$$+ R^2) + T_Q(x_Cx''_q + x_Cx_d + 2x_dx''_q + R^2) + R(x_q + x_d);$$
$$a_5 = T_{d0}T_Q(x'_d - x_C)(x''_q - x_C) + T_{d0}T_QR^2 +$$
$$+ T_{d0}T_2(x''_d - x_C)(x_q - x_C) + T_{d0}T_2R^2 +$$
$$+ T_QT_D(x_1 - x_C)(x''_q - x_C) + T_QT_DR^2 + T_{d0}R(2x_C +$$
$$+ x_q + x'_d) + T_DR(x_q + x_1 + 2x_C) + T_QR(x_d + x''_q +$$
$$+ 2x_C) + x_qx_C + 2x_qx_d + x_Cx_d + R^2;$$
$$a_6 = T_{d0}(x'_d - x_C)(x_q - x_C) + T_{d0}R^2 + T_D(x_q - x_C)(x_1 -$$
$$- x_C) + T_DR^2 + T_Q(x_d - x_C)(x''_q - x_C) + T_QR^2 +$$
$$+ R(x_q + x_d + 2x_C);$$
$$a_7 = (x_d - x_C)(x_q - x_C) + R^2.$$

Constantele de timp T_{d0}, T_Q și T_D corespunzătoare respectiv înfășurării de excitație, înfășurării de amortizare transversale și celei longitudinale se determină din următoarele expresii (în ipoteza că pe lîngă circuitul analizat nu există alte circuite închise):

$$T_{d0} = \frac{x_{ffd}}{R_{fd}}; \quad T_Q = \frac{x_{11q}}{R_{1q}}; \quad T_D = \frac{x_{11d}}{R_{1d}}. \tag{2.18}$$

Valorile reactanțelor pot fi aflate astfel:

$$\left.\begin{aligned} & x_{ffd} = x_{fl} + x_{ad}; \; x_{11d} = x_{l1d} + x_{ad}; \; x_{11q} = x_{l1q} + x_{ad}; \\ & x'_d = x_l + \frac{1}{\frac{1}{x_{fl}} + \frac{1}{x_{ad}}}; \\ & x''_d = x_l + \frac{1}{\frac{1}{x_{fl}} + \frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{l1d}}}; \quad x''_q = x_l + \frac{1}{\frac{1}{x_{l1q}} + \frac{1}{x_{aq}}}, \end{aligned}\right\} \tag{2.19}$$

Scanned with OKEN Scanner

unde : x_l, x_{fl} sînt reactanțele de scăpări ale înfășurărilor statorului și rotorului;

x_{l1d}, x_{l1q} — reactanțele de scăpări ale înfășurării de amortizare de-a lungul axelor longitudinală și transversală.

Reactanța inductivă x_1 reprezintă reactanța tranzitorie de-a lungul axei longitudinale a mașinii ce are două circuite pe această axă : înfășurarea statorului și înfășurarea de amortizare (înfășurarea de excitație lipsește sau este deschisă).

Reactanța x_1 poate fi calculată cu formula

$$x_1 = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_{11d}}. \tag{2.20}$$

Pentru hidrogeneratoarele tipizate și pentru compensatoarele sincrone mari, raportul $\frac{x_1}{x'_d}$ reprezintă aproximativ 0,7 ; pentru hidrogeneratoarele de la hidrocentrala de pe Volga, acest raport are valoarea 0,9.

Constanta de timp a înfășurării de amortizare de-a lungul axei longitudinale, cînd înfășurarea de excitație este închisă și înfășurarea statorului este deschisă, are expresia

$$T_2 = \frac{x_{11d} - \frac{x_{ad}^2}{x_{ffd}}}{R_{1d}}. \tag{2.21}$$

Analizînd ecuația caracteristică (2.17) se pot determina zonele de autoexcitație ale mașinii cu înfășurări de amortizare (fig. 2.6). Existența circuitelor închise ale înfășurărilor de amortizare longitudinale și transversale ale rotorului nu influențează zona de autoexcitare sincronă. Frontiera zonei de autoexcitare sincronă rămîne aceeași, independent dacă sînt sau nu închise circuitele de pe rotor. Acest fapt este confirmat de aceea că termenul liber a_7 al ecuației caracteristice (2.17) are aceeași expresie ca și în ecuația (2.6). Prin urmare toate raționamentele referitoare la zona de autoexcitare sincronă pentru mașina fără înfășurări de amortizare rămîn valabile pentru mașina prevăzută cu circuit de amortizare longitudinalo-transversal.

Scanned with OKEN Scanner

Criteriul exact al zonei de autoexcitare asincronă îl constituie egalarea cu zero a penultimului minor, în cazul dat

$$\Delta_6 = 0. \tag{2.22}$$

Criteriul aproximativ al limitei zonei de autoexcitare asincronă îl constituie egalarea cu zero a penultimului coeficient din ecuația caracteristică,

$$a_6 = 0. \tag{2.23}$$

În ecuația (2.17) pot fi făcuți nuli coeficienții a_4 și a_5, pe lîngă coeficientul a_6, ceea ce arată posibilitatea apariției unor zone suplimentare pentru autoexcitarea asincronă datorită acțiunii înfășurărilor de amortizare și care pot fi determinate cu criteriile aproximative $a_4 = 0$ și $a_5 = 0$.

După cum arată calculele și experiența, este suficient să se analizeze doar criteriul aproximativ al zonei principale, iar influența înfășurării de amortizare în domeniul $x_C < x'_d$ să fie considerată în întregime și mai exact din condiția $\Delta_6 = 0$.

Metoda determinării zonelor de autoexcitare a mașinii echipate cu înfășurare de amortizare longitudinalo-transversală se reduce deci la următoarea : zona *I* a autoexcitării sincrone se găsește exact în același mod ca și pentru mașina fără înfășurări de amortizare [criteriul (2.9a)]. Pentru valorile obișnuite ale constantei de timp a înfășurării de excitație ($T_{d0} > 3 - 4$ s) și în cazul construcției obișnuite a înfășurării de amortizare, zona *II* a autoexcitării asincrone, între limitele x_d și x_q se determină destul de exact cu semicercul avînd centrul pe axa ordonatelor situat la distanța $\frac{x'_d + x_q}{2}$ de originea axelor de coordonate și raza de $\frac{x_q - x'_d}{2}$ adică același procedeu ca și în cazul

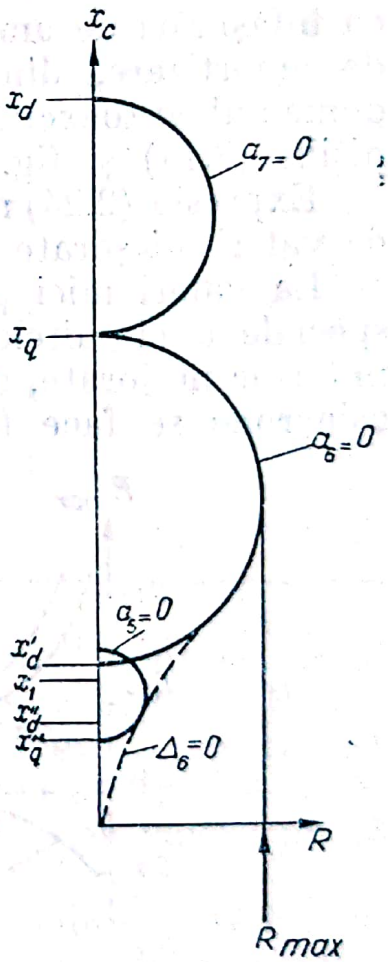


Fig. 2.6. Zonele de autoexcitare a unei mașini sincrone cu poli aparenți, cu înfășurări de amortizare.

inexistenței la mașină a înfășurărilor de amortizare. Se poate găsi mai precis valoarea maximă a rezistenței R_{max} pentru zona II a autoexcitării asincrone, folosind expresia obținută din $a_6 = 0$

$$R_{max} = \frac{\sqrt{T_{d0}(x_q - x'_d) + T_D(x_q - x_1) + T_Q(x_d - x''_q)]^2 + 4T_{d0}T_Q(x_d - x_q)(x'_d - x''_q) + 4T_QT_D(x_d - x_q)(x_1 - x''_q)}}{2(T_{d0} + T_D + T_Q)} \quad (2.24)$$

Din (2.24) și fig. 2.7 rezultă că micșorarea constantei de timp a înfășurării de excitație duce la creșterea lui $R_{max.}$, adică la extinderea zonei II a autoexcitării asincrone a mașinii cu înfășurări de amortizare [în cazul mașinii fără înfășurări de amortizare, dimpotrivă micșorarea lui T_{d0} îngustează domeniul autoexcitării asincrone, fapt ce se vede din condițiile (2.14) și fig. 2.3].

Expresia (2.24) nu se poate utiliza dacă $T_{d0} < 3$ s, deoarece dă valori micșorate pentru R_{max} în comparație cu cele reale.

La valori mici pentru T_{d0}, cum și în cazul construcției speciale a circuitelor de amortizare cu constante de timp puternic majorate, determinarea zonei a II-a a autoexcitării asincrone se face folosind criteriul exact (2.22).

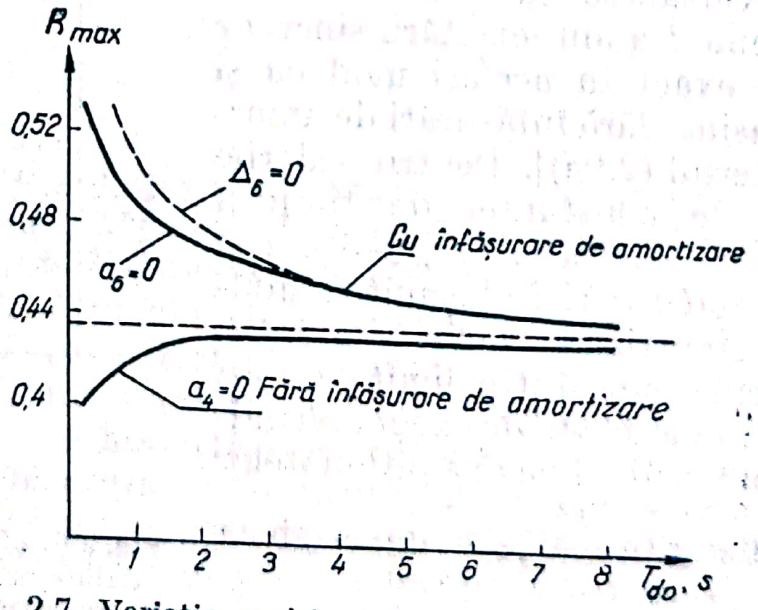


Fig. 2.7. Variația rezistenței maxime a zonei II în funcție de cea a constantei de timp T_{d0} pentru mașini cu și fără înfășurări de amortizare.

La determinarea zonei *III* a autoexcitării asincrone ($x_C < x'_d$), trebuie să se folosească în toate cazurile condiția $\Delta_6 = 0$ sau oricare alt criteriu de stabilitate. În cazul dat este recomandabilă folosirea criteriului Routh [1]).

Pentru ecuația (2.17), de gradul șapte, criteriul Routh are forma din tabelul 2.1.

Tabelul 2.1

—	$C_{11} = a_0$	a_2	a_4	a_6
—	$C_{12} = a_1$	a_3	a_5	a_7
$\lambda_1 = \frac{a_0}{a_1}$	$C_{13} = a_2 - \lambda_1 a_3$	$C_{23} = a_4 - \lambda_1 a_5$	$C_{33} = a_6 - \lambda_1 a_7$	—
$\lambda_2 = \frac{a_1}{C_{23}}$	$C_{14} = a_3 - \lambda_2 C_{23}$	$C_{24} = a_5 - \lambda_2 C_{33}$	$C_{34} = a_7$	—
$\lambda_3 = \frac{C_{13}}{C_{14}}$	$C_{15} = C_{23} - \lambda_3 C_{24}$	$C_{25} = C_{33} - \lambda_3 a_7$	—	—
$\lambda_4 = \frac{C_{14}}{C_{15}}$	$C_{16} = C_{24} - \lambda_4 C_{25}$	$C_{26} = a_7$	—	—
$\lambda_5 = \frac{C_{15}}{C_{16}}$	$C_{17} = C_{25} - \lambda_5 a_7$	—	—	—
—	$C_{18} = a_7$	—	—	—

Criteriul Hurvitz $\Delta_6 = 0$, care determină zona de autoexcitare asincronă, este corespunzător criteriului Routh $C_{17} = 0$. Calculul cu ajutorul criteriului Routh se efectuează prin alegerea valorii R, care face ca pentru un x_C dat coeficientul C_{17} din tabelul 2.1 să fie nul. Alegerea valorii lui R se poate face cu precizia dorită.

Domeniul *III* al autoexcitării poate fi definit de asemenea pe baza utilizării caracteristicilor asincrone ale mașinilor,

---

[1]) Construirea frontierei zonei de autoexcitare prin metoda dizolvării necesită timp mai mult, deoarece parametrii R și x_C intră neliniar în ecuația (2.7). În acest caz problema determinării limitelor de stabilitate se rezolvă în esență prin căutarea valorilor corespunzătoare pentru R și x_C.

Scanned with OKEN Scanner

prin metoda propusă de N. A. Poleak [2] sau prin metoda frecvențelor, schimbînd mașinile sincrone în mașini asincrone cu caracteristici de frecvență medii în sistemul de axe d și q (amănunțit, v. cap. 4).

Analizînd influența parametrilor înfășurărilor de amortizare asupra zonelor *II* și *III* ale autoexcitării asincrone, se observă că înfășurarea longitudinală de amortizare nu influențează limita superioară a zonei *II*, unde $x_{C1} \approx x_q$, însă deplasează limita inferioară a zonei spre valorile mai mici ($x_{C2} \to x_1$). Valoarea cu care se deplasează zona depinde de raportul constantelor de timp ale înfășurării de excitație T_{d0} și înfășurării de amortizare longitudinale T_D. În cazul cînd înfășurarea de amortizare are o acțiune slabă, adică atunci cînd $T_{d0} \gg T_D$, limita inferioară a zonei *II* se apropie de valoarea x'_d, ceea ce corespunde lipsei circuitului de amortizare în mașină. Cînd constanta de timp T_D este mare, zona de autoexcitare se deplasează cu o mărime ce poate fi determinată din condiția $x_{C2} = x_1$ (la $T_D \gg T_{d0}$).

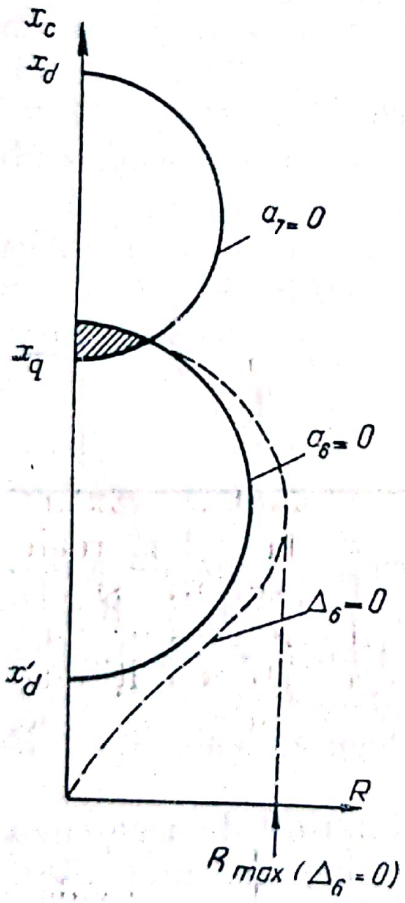


Fig. 2.8. Suprapunerea zonelor autoexcitării sincrone și asincrone la valori mici ale constantei de timp T_{d0}(T_{d0} = 0,9 s).

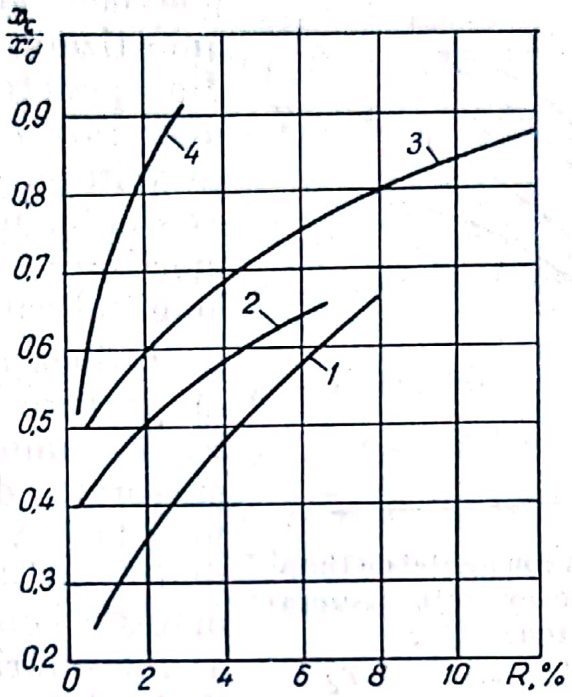
Înfășurarea de amortizare transversală influențează atît limita superioară, cît și cea inferioară ale zonei *II* de autoexcitare și anume: limita superioară se deplasează în domeniul $x_{C1} > x_q$, iar cea inferioară în domeniul $x_C < x'_d$.

În cazul limită, cînd $T_Q \gg T_{d0}$, zona *II* de autoexcitare este limitată de valorile

$$x_{C1} = x_d; \qquad x_{C2} = x''_q.$$

Datorită influenței înfășurării de amortizare transversale poate apărea suprapunerea zonelor de autoexcitare sincronă și asincronă, lucru cel mai probabil la valori mici ale rezistenței acesteia sau ale constantei de timp T_{d0} a mașinii (fig. 2.8).

La existența în mașină a înfășurării de amortizare longo-transversale, zona *III* a autoexcitării asincrone ($x_C < x'_d$) se lărgește, se caracterizează prin rezistențe de ordinul a 5—10% și devine reală pentru apariția autoexcitării îndeosebi



Fiig. 2.9. Frontiera zonei *III* la diverse construcții ale înfășurării de amortizare:

1 — Înfășurarea de amortizare longitudinală și transversală cu bare de alamă; *2* — idem, cu bare de cupru; *3* — înfășurare de amortizare transversală cu bare de cupru; *4* — frontiera zonei *III* în cazul cînd nu sînt înfășurări de amortizare.

în schemele cu compensare longitudinală capacitivă. Extinderea zonei *III* a autoexcitării se observă la valori reale ale constantelor de timp ale înfășurării de excitație și ale înfășurării de amortizare, și depinde de valorile acestor constante. Extinderea cea mai pronunțată a zonei este condiționată de existența înfășurării de amortizare care acționează pe ambele axe ale rotorului (fig. 2.9).

Determinarea zonelor de autoexcitare ale mașinii cu înfășurări de amortizare trebuie făcută cu luarea în considerare a zonei *III* de autoexcitare, întrucît ea este limitată de valorile rezistențelor care depășesc cu mult rezistența schemei.

Prin alegerea corespunzătoare a parametrilor înfășurării de amortizare se poate micșora zona inferioară *III* a autoexcitării asincrone. În acest sens, cea mai indicată apare

folosirea maşinii simetrice din punctul de vedere al axelor d şi q, cu constantă de timp mare $T'_d = T'_q$. Pentru o asemenea maşină, zona inferioară III de autoexcitare se îngustează la fel ca în cazul maşinii monoaxiale fără înfăşurări de amortizare. Rezultate bune din punctul de vedere al micşorării zonei III de autoexcitare se obţin în cazul existenţei înfăşurării de amortizare numai pe axa longitudinală.

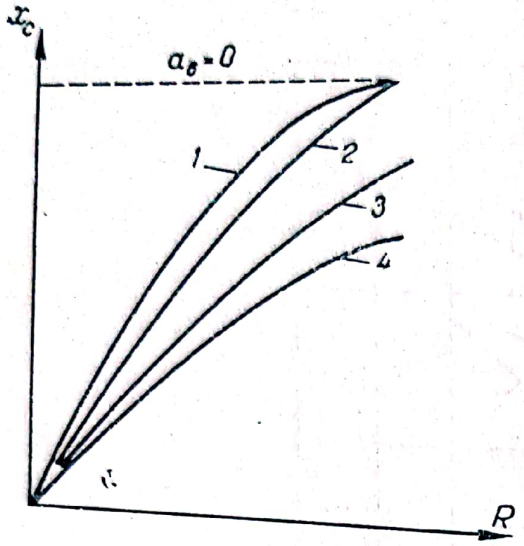


Fig. 2.10. Influenţa constantei de timp T_{d0} a înfăşurării de excitaţie asupra frontierei zonei III:
$1 - T_{d0} = 8$ s; $2 - T_{d0} = 5{,}5$ s; $3 - T_{d0} = 1$ s; $4 - T_{d0} = 0{,}3$ s.

Influenţa dezavantajoasă pe care o are înfăşurarea de amortizare poate fi micşorată dacă se reduce pînă la o valoare oarecare limită rezistenţa sa sau se măreşte constanta de timp a înfăşurării de excitaţie (fig. 2.10).

2.3. *Determinarea zonelor de autoexcitare ale maşinilor electrice cu poli înnecaţi (generatoare asincrone, motoare asincrone şi turbogeneratoare sincrone)*

Maşini asincrone. Ecuaţia proceselor tranzitorii pentru o maşină asincronă care funcţionează pe bare de tensiune constantă, prin capacitate şi rezistenţă (fig. 2.11), cu viteză constantă Ω[1]), are următoarea expresie :

$$U = R\check{I}\,\frac{x_C}{p + j\omega}\,I + (p + j\Omega)\psi, \qquad (2.25)$$

în care

$$\psi = Ix(p);$$

$$x(p) = \frac{x + pTx'}{pT + 1};$$

[1]) În cazul cînd viteza rotorului este variabilă, putem calcula aproximativ zonele de autoexcitare ale maşinii în ipoteza că viteza este constantă în fiecare moment.

$\Omega = 1 - s$ — pentru motorul asincron (MA);
$\Omega = 1 + s$ — pentru generatorul asincron (GA).

Din ecuația (2.25) se deduce ecuația caracteristică a sistemului, folosind notațiile de mai sus, ea are expresia

$$D(p) = Tx'p^3 + (TR + x)p^2 + j2\Omega Tx'p^2 + (R + Tx_C - T\Omega^2 x')p + j\Omega(TR + 2x)p + x_C - \Omega^2 x + j\Omega R = 0.$$

Pentru construirea domeniilor de autoexcitare se recomandă metoda divizării. După înlocuirea lui p cu $j\omega$ și prin separarea părților reală și imaginară ajungem la sistemul de două ecuații:

$$\left.\begin{aligned} &Tx'\omega^3 - 2\Omega Tx'\omega^2 - (R + Tx_C - T\Omega^2 x')\omega + \Omega R = 0; \\ &-(TR + x)\omega^2 + \Omega(TR + 2x)\omega + x_C - \Omega^2 x = 0. \end{aligned}\right\} \quad (2.26)$$

Rezolvarea sistemului de ecuații (2.26) pentru diverse valori ale lui ω dă legătura între R și x_C la limita stabilității, pentru o valoare dată aprioric vitezei de rotație ω a rotorului mașinii (fig. 2.12).

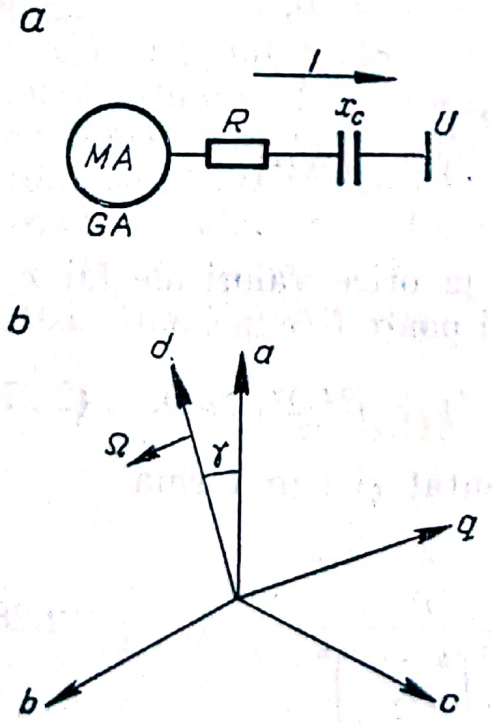


Fig. 2.11. Sistemul „mașina asincronă — capacitate — bare cu tensiune constantă":
a — reprezentarea sistemului; b — diagrama vectorială.

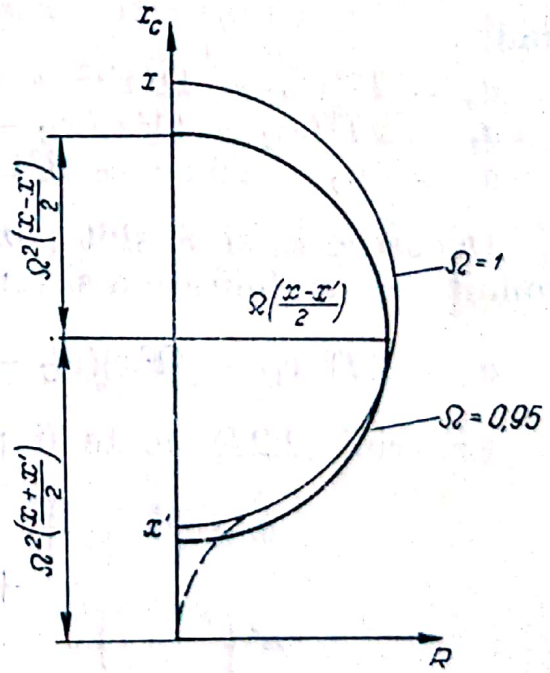


Fig. 2.12. Zona autoexcitării unei mașini asincrone.

Deci, mașinile asincrone se pot autoexcita prin existența în circuitul statorului a unei reactante capacitive limitate (la $\Omega = 1$) între valorile

$$0 < x_C < x.$$

Cînd $\Omega < 1$, domeniul autoexcitării se îngustează (fig. 2.12)

Frontiera zonei de autoexcitare a mașinii asincrone poate fi construită simplificat, prin neglijarea proceselor tranzitorii în stator și considerîndu-se viteza de rotație a rotorului ca fiind constantă. Vom examina următoarele relații ce descriu procesul în condițiile aproximațiilor făcute:

$$-U_d\Omega = -R\Omega i_d + \left[\Omega^2 \frac{x + px'T}{1 + pT} - x_C\right] i_q;$$

$$-U_q\Omega = \left[x_C - \Omega^2 \frac{x + px'T}{1 + pT}\right] i_d - R\Omega i_q.$$

Dacă aci se poate obține ecuația caracteristică a sistemului

$$D(p) = a_0p^2 + a_1p + a_2 = 0,$$

unde:

$$a_0 = T^2[(x_C - \Omega^2x')^2 + R^2\Omega^2];$$
$$a_1 = 2T[(x_C - \Omega^2x)(x_C - \Omega^2x') + R^2\Omega^2];$$
$$a_2 = (x_C - \Omega^2x)^2 + R^2\Omega^2.$$

Deoarece a_0 și a_2 sînt pozitivi la orice valori ale lui x_C, condiția de stabilitate a sistemului poate fi exprimată astfel

$$a_1 = 2T[(x_C - \Omega^2x)(x_C - \Omega^2x') + R^2\Omega^2] \geqslant 0. \qquad (2.27)$$

Criteriul (2.27) poate fi prezentat și sub forma

$$\frac{x_C - \Omega^2\left(\frac{x' + x}{2}\right)^2}{\Omega^4\left(\frac{x - x'}{2}\right)^2} + \frac{R^2}{\Omega^2\left(\frac{x - x'}{2}\right)^2} = 1. \qquad (2.28)$$

Ecuația (2.28) determină frontiera aproximativă a autoexcitării mașinii asincrone; domeniul autoexcitării reprezintă o elipsă al cărui centru este situat pe axa ordonatelor, la

distanța $\Omega^2\left(\frac{x+x'}{2}\right)$ de la originea axelor; semiaxele elipsei sînt egale cu $\frac{\Omega(x-x')}{2}$ și $\Omega^2\ \frac{x-x'}{2}$.

Fiecărei valori a lui Ω îi corespund anumite limite ale autoexitării, în funcție de x_C și R. La $\Omega = 1$, adică la viteza sincronă a mașinii asincrone, domeniul de autoexcitație degenerează în cerc, a cărei ecuație este

$$(x_C - x\,(x_C - x') + R^2 = 0.$$

Așadar, la viteza sincronă, limita zonei aproximative de autoexcitare asincronă se determină cu relațiile:

$$x' < x_C < x;$$

$$R_{max} \leqslant \frac{x-x'}{2}.$$

În fig. 2.12 sînt reprezentate zonele de autoexcitare ale mașinii asincrone la diverse viteze de rotație ale rotorului.

Cu criteriul (2.28) nu se poate determina partea inferioară a limitei de autoexcitare asincronă ($x_C < x'$). Pentru construirea acestei părți a zonei de autoexcitare asincronă se poate utiliza ecuația caracteristică a sistemului folosind metoda frecvențelor (v. subcap. 2.4).

Din (2.25) se pot obține condițiile ce determină valorile x_C și R la limita zonei *III* de autoexcitare asincronă, sub forma:

$$\left.\begin{aligned} R &= (\Omega - \omega)\frac{\omega T(x-x')}{1+\omega^2T^2}; \\ x_C &= (\Omega - \omega)^2\frac{x+\omega^2T^2x'}{1+\omega^2T^2}. \end{aligned}\right\} \qquad (2.29)$$

Dînd lui Ω diverse valori, se poate obține limita părții inferioare a zonei autoexcitării asincrone, la valoarea adoptată pentru Ω.

Criteriile (2.28) și (2.29) dau împreună posibilitatea de a se obține zona completă a autoexcitării mașinii asincrone, adică la $0 < x_C < x$.

Scanned with OKEN Scanner

Turbogeneratoarele. Mașinile cu poli înnecați (turbogeneratoarele) au rotorul masiv care echivalează cu o serie de circuite de amortizare închise de-a lungul axelor d și q. Această circumstanță îngreuiază atît obținerea expresiilor $x_d(p)$ și $x_q(p)$, cît și obținerea ecuației caracteristice a sistemului. La analizarea simplificată a proceselor în turbogenerator, pe acesta îl putem considera ca mașină cu un circuit de amortizare de-a lungul axei longitudinale și altul de-a lungul axei transversale sau ca o mașină simetrică față de axele d și q, care nu are înfășurări de amortizare. Procesele din turbogeneratoarele reale vor putea fi încadrate într-o situație intermediară față de aproximațiile adoptate.

Se studiază autoexcitarea turbogeneratorului plecînd de la condiția a doua, adică

$$x_d(p) = x_q(p) = \frac{p x'_d T_{d0} + x_d}{1 + p T_{d0}}.$$

Dacă se înlocuiește p cu $j\omega$ în ecuația caracteristică a mașinii simetrice din punct de vedere magnetic, putem obține sistemul de ecuații cu două necunoscute (x_C și R)

$$\left.\begin{aligned} &\omega^2(x_d + R T_{d0}) - \omega(R T_{d0} + 2x_d) + (x_d - x_C) = 0; \\ &\omega^3 x'_d T_{d0} - 2\omega^2 x'_d T_{d0} + \omega[T_{d0}(x'_d - x_C) - R] + R^2 = 0. \end{aligned}\right\} (2.30)^{1)}$$

Acest sistem de ecuații va fi folosit pentru determinarea zonelor de autoexcitare.

Dînd lui ω diverse valori, cu ajutorul relației (2.30) se calculează legătura dintre x_C și R, la limita de stabilitate. Studiul ecuației caracteristice arată că turbogeneratoarele nu au zone de autoexcitare sincronă.

Zona completă a autoexcitării asincrone a turbonerotorului se situează între limitele $0 < x_C < x_d$ (fig. 2.13).

Zona inferioară a autoexcitării turbogeneratoarelor ($x_C < x'_d$) este mult mai largă decît la hidrogeneratoare. Acest lucru se datorește capacității turbogeneratoarelor de a dezvolta un cuplu asincron suficient de mare în timpul cînd funcționează la alunecări atît mari, cît și mici.

---

[1]) Sistemul de ecuații (2.30) corespunde sistemului de ecuații (2.26).

Dacă constantele de timp ale înfăşurării de excitaţie sînt suficient de mari, zona *II* de excitare a turbogeneratorului reprezintă aproximativ un semicerc a cărui ecuaţie este

$$(x_C - x_d)(x_C - x'_d) + R^2 = 0. \qquad (2.31)$$

Limita zonei, determinată cu criteriul aproximativ (egalînd cu zero coeficientul variabilei p la puterea întîia) corespunde inegalităţii

$$x'_d < x_C < x_d.$$

Zona autoexcitării *III*, la $x_C < x'_d$, poate fi găsită dacă este nevoie şi cu expresiile analoge cu (2.29), considerînd viteza de rotaţie sincronă a rotorului $\Omega = 1$ şi anume:

$$\left.\begin{aligned} R &= (1 - \omega)\frac{\omega T_{d0}(x_d - x'_d)}{1 + \omega^2 T_{d0}^2}; \\ x_C &= (1 - \omega)^2\frac{x_d + \omega^2 T_{d0}^2 x'_d}{1 + \omega^2 T_{d0}^2}. \end{aligned}\right\} \qquad (2.32)$$

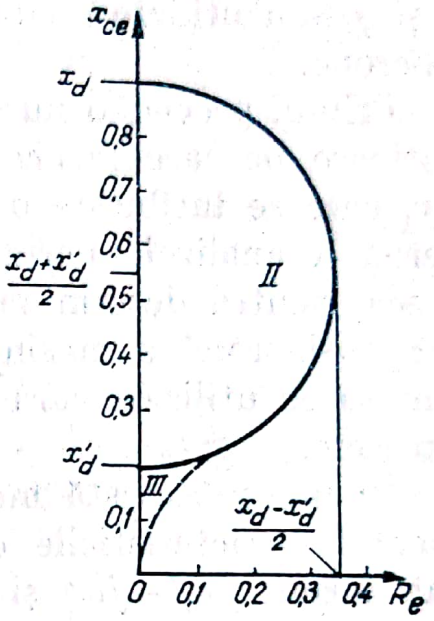


Fig. 2.13. Zona autoexcitării unui turbogenerator.

Pentru obţinerea întregului domeniu de autoexcitare, limitele zonelor *II* şi *III*, găsite conform condiţiilor (2.31) şi (2.32), se unesc printr-o curbă continuă. Astfel, domeniul autoexcitării turbogeneratorului coincide suficient de bine cu domeniul găsit prin metoda exactă, cu ecuaţiile (2.30). Oportunitatea folosirii criteriului (2.31) şi (2.32) constă în aceea că pentru construirea zonelor de autoexcitare cu ajutorul lor este necesar un timp mai scurt decît în cazul ecuaţiilor (2.30).

2.4. *Construirea limitelor zonei III de autoexcitare asincronă luînd în considerare caracteristicile de frecvenţă ale maşinii sincrone*

În zona *III* de autoexcitare asincronă alunecarea cîmpului statorului faţă de rotor poate varia de la zero pînă la unitate. În acest caz parametrii maşinii sincrone sînt funcţii

de alunecare din cauza fenomenului de refulare a curentului în înfăşurarea de excitaţie şi din cauza rotorului masiv al maşinii. Dependenţa parametrilor maşinii sincrone faţă de alunecare poate fi calculată pe două căi : schimbînd circuitele rotorului în circuite cuplate magnetic, situate pe axele d şi q, sau utilizînd caracteristicile de frecvenţă ale maşinii sincrone.

Primul procedeu nu se utilizează din cauza calculelor laborioase pe care le necesită. Utilizarea metodei frecvenţelor, care se întîlneşte din ce în ce mai des în tehnica modernă a analizei, permite să se simplifice calculele. De aceea, pentru determinarea limitelor zonei *III* de autoexcitare asincronă a maşinilor sincrone şi asincrone este oportun să se utilizeze caracteristicile de frecvenţă ale maşinii sincrone.

În prezent există metode ce permit să se ridice experimental caracteristicile de frecvenţă ale maşinilor sincrone sub forma $jx_d(-j\omega)$ şi $jx_q(-j\omega)$. Aceste caracteristici ţin seama de schimbarea parametrilor maşinii sincrone în funcţie de alunecare.

Caracteristicile de frecvenţă ale maşinii sincrone pot fi calculate cu ajutorul expresiilor reactanţelor operaţionale $x_d(p)$ şi $x_q(p)$, prin înlocuirea $p = -j\omega$ şi înmulţindu-le cu j. După aceasta, expresiile se împart în două părţi, imaginară şi reală. Partea lor reală corespunde rezistenţei negative, care este proporţională cu puterea activă dezvoltată de maşina sincronă în regim asincron.

Caracteristicile de frecvenţă ale maşinii sincrone fără înfăşurări de amortizare, obţinute din expresiile reactanţelor inductive operaţionale $x_d(p)$ şi $x_q(p)$, pot fi scrise astfel :

$$\left.\begin{aligned} jx_d(-j\omega) &= -\frac{(x_d - x'_d)\,\omega T_{d0}}{1+\omega^2 T_{d0}^2} + j\frac{x_d + x'_d\,\omega^2 T_{d0}^2}{1+\omega^2 T_{d0}^2} = \\ &= R_d(\omega) + jX_d(\omega); \\ jx_q(-j\omega) &= jX_q. \end{aligned}\right\} \qquad (2.33)$$

Pentru maşina sincronă cu înfăşurări de amortizare, caracteristicile de frecvenţă se scriu în modul următor:

$$\left.\begin{aligned}
jx_d(-j\omega) &= \frac{(1-\sigma_{dD}T_{d0}T_D\omega^2)(x'_dT_{d0}+x_1T_D)-}{(1-\sigma_{dD}T_{d0}\omega^2)^2+(T_{d0}+T_D)^2\omega^2} \\
&\quad \frac{-(T_{d0}+T_D)(x_d-\sigma_{dD}x''_dT_{d0}T_D\omega^2)}{(1-\sigma_{dD}T_{d0}\omega^2)^2+(T_{d0}+T_D)^2\omega^2}\omega + \\
&\quad +j\frac{(x_d-\sigma_{dD}x''_dT_{d0}T_D\omega^2)(1-\sigma_{dD}T_{d0}T_D\omega^2)+}{(1-\sigma_{dD}T_{d0}T_D\omega^2)+(T_{d0}+T_D)^2\omega^2} \\
&\quad \frac{+(T_{d0}+T_D)(x'_dT_{d0}+x_1T_D)\omega^2}{(1-\sigma_{dD}T_{d0}T_D\omega^2)+(T_{d0}+T_D)^2\omega^2} = \\
&= R_d(\omega)+jX_d(\omega); \\
jx_q(-j\omega) &= -\frac{(x_q-x''_q)\omega T_Q}{1+\omega^2T_Q^2}+j\frac{x_q+x''_q\omega^2T_Q^2}{1+\omega^2T_Q^2} = \\
&= R_q(\omega)+jX_q(\omega),
\end{aligned}\right\} \quad (2.34)$$

unde σ_{dD} este coeficientul de scăpări între înfăşurarea de excitaţie şi înfăşurarea longitudinală de amortizare.

În fig. 2.14 sînt reprezentate caracteristicile de frecvenţă ale maşinii sincrone, fără înfăşurare de amortizare, în funcţie de ω; analizînd curbele se vede că pentru maşinile fără înfăşurări de amortizare aceste caracteristici de frecvenţă diferă esenţial pentru axele d şi q. Astfel, la alunecări mari, de-a lungul axei longitudinale există reactanţa x'_d a maşinii, iar de-a lungul axei transversale — reactanţa x_q.

În fig. 2.15, *a* şi *b* sînt reprezentate caracteristicile de frecvenţă ale maşinii cu înfăşurări de amortizare construite conform expresiilor date anterior. La frecvenţe mici ω, caracteristicile de frecvenţă de-a lungul axelor d şi q diferă mult una faţă de alta, ceea ce se explică prin caracterul de poli aparenţi ai maşinii şi prin monoaxilitatea ei. În cazul cînd $\omega \geqslant 0{,}2$ caracteristicile de frecvenţă ale maşinii sincrone de-a lungul axelor d şi q coincid practic adică maşina sincronă devine iar o maşină simetrică apropiată de cea

asincronă. De aci reiese că la alunecări mari, maşina cu înfăşurări de amortizare se poate înlocui cu o maşină asincronă echivalentă. Caracteristicica de frecvenţă a acestei maşini

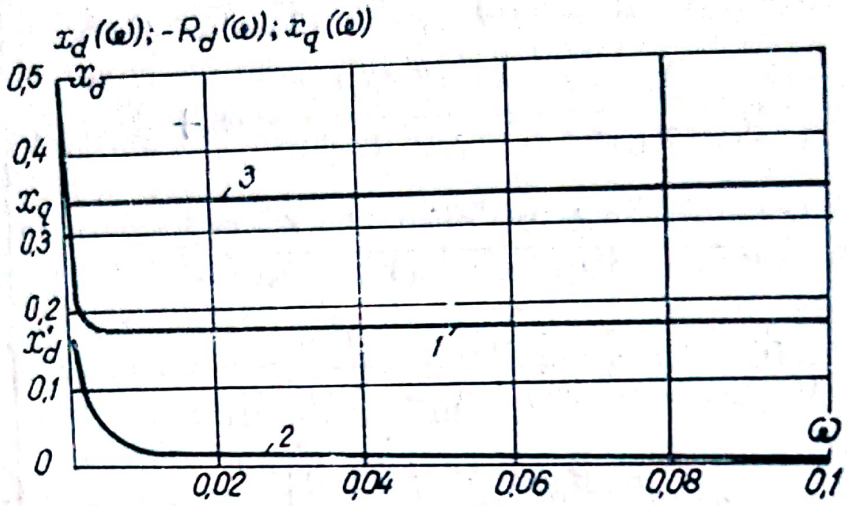


Fig 2.14. Caracteristicile de frecvenţă ale hidrogeneratorului fără înfăşurări de amortizare:
1 — $x_d(\omega)$; 2 — $R_d(\omega)$; 3 — $x_q(\omega)$.

asincrone echivalente se defineşte ca valoarea medie a caracteristicilor de frecvenţă ale maşinii sincrone iniţiale de-a lungul axelor d şi q, adică

$$jx(-j\omega) = \frac{j}{2}[x_d(-j\omega) + x_q(-j\omega)] =$$

$$= \frac{1}{2}[R_d(\omega) + R_q(\omega)] + \frac{j}{2}[X_d(\omega) + X_q(\omega)].$$

Înlocuirea maşinii sincrone cu una asincronă echivalentă dă posibilitatea să se reprezinte sistemul dinamic, care are elemente în rotaţie, printr-o schemă cu elemente statice. După aceea, calcularea limitelor zonei *III* de autoexcitare se reduce la determinarea condiţiilor de rezonanţă în schema statică, fapt care uşurează calculul.

Ecuaţiile Park-Gorev, care definesc zonele de autoexcitare pentru o maşină asincronă ce se roteşte cu viteză constantă de sincronism şi care debitează printr-o capacitate

pe bare de tensiune constantă (fig. 2.16, *a*) au următoarele expresii :

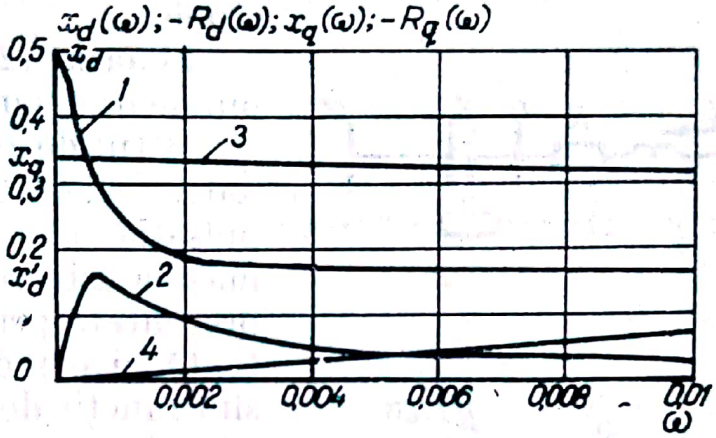
$$U_d = -[px(p) + R]i_d - x(p)\, i_q;$$

$$U_q = x(p)\, i_d - [px(p) + R]\, i_q;$$

$$(p^2 + 1)(U_d - U'_d) = x_C p i_d - x_C i_q;$$

$$(p^2 + 1)(U_q - U'_q) = x_C i_d + x_C p i_q.$$

a



b

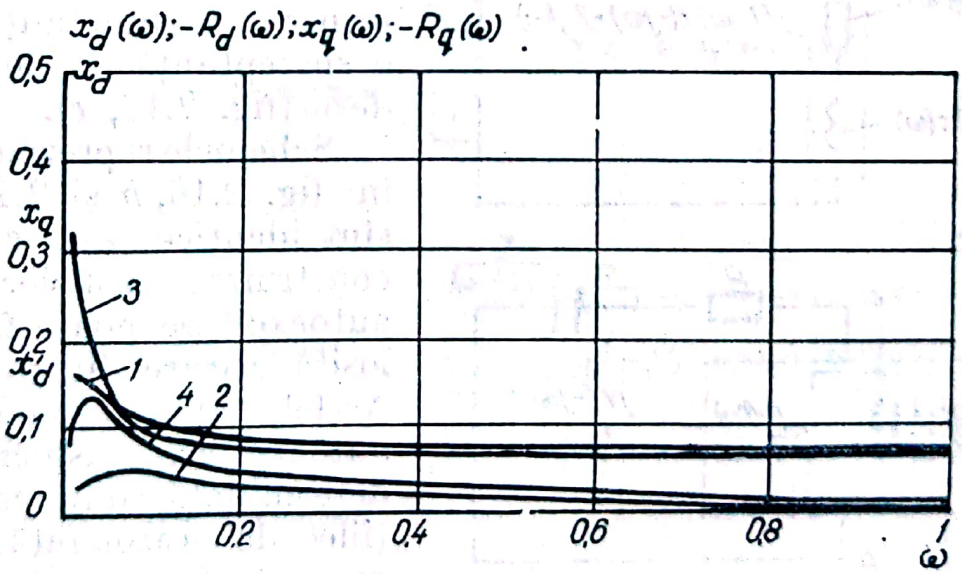


Fig. 2.15. Caracteristicile de frecvenţă ale unei maşini sincrone cu poli aparenţi cu înfăşurări de amortizare de-a lungul axelor longitudinale şi transversale :

a — la alunecări mici; *b* — la alunecări mari;
1 — $x_d(\omega)$; 2 — $R_d(\omega)$; 3 — $x_q(\omega)$; 4 — $R_q(\omega)$.

După unele transformări se poate obține ecuația caracteristică

$$\left[(p+j)\,x(p)+R+\frac{x_C}{p+j}\right]\left[(p-j)\,x(p)+R+\frac{x_C}{p-j}\right]=0.$$

Înlocuind în primul termen al produsului pe $p=-j\omega$, unde ω este pulsația oscilațiilor libere (în unități relative) din circuitele rotorului, obținem

$$j(1-\omega)\,x(-j\omega)+R+\frac{x_C}{j(1-\omega)}=0, \qquad (2.35)$$

unde $x(-j\omega)$ este caracteristica de frecvență a mașinii asincrone.

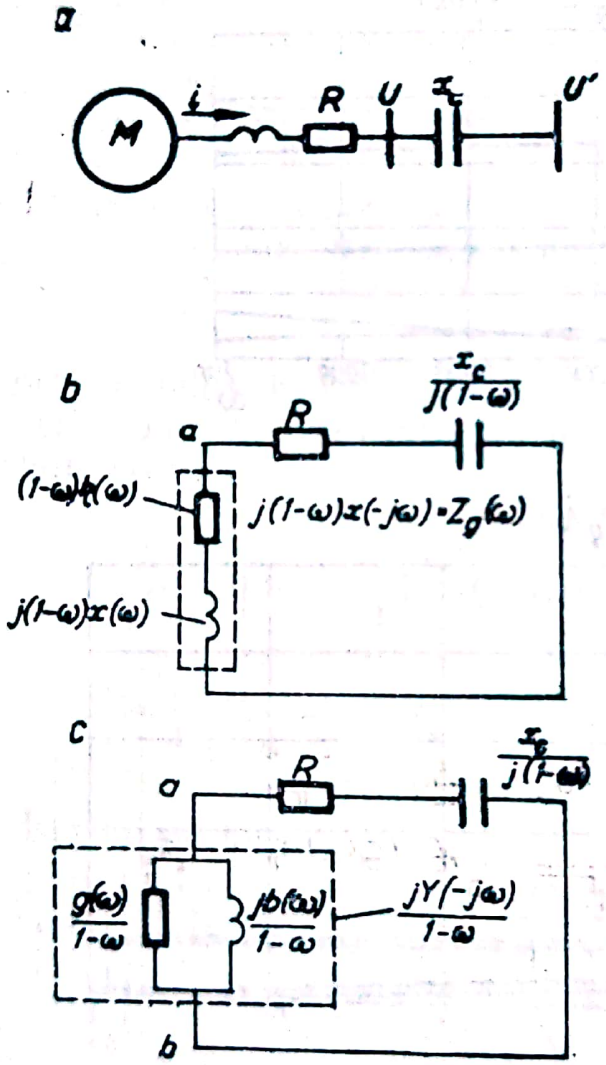


Fig. 2.16. Schemele echivalente pentru construirea zonei *III* a autoexcitării asincrone a unei mașini asincrone:

a — schema de funcționare a mașinii asincrone; *b* — mașina reprezentată prin impedanțe; *c* — mașina reprezentată prin admitanțe.

Ecuația (2.35) corespunde unui circuit simplu străbătut de curent alternativ (fig. 2.16,*b*), cu pulsația $(1-\omega)$, în care mașina asincronă este reprezentată printr-o rezistență și o inductanță ce sînt funcții de ω. Este posibil de asemenea ca mașina să fie reprezentată printr-o conductanță și o susceptanță ce depind de ω (fig. 2.16, *c*).

Schemele reprezentate în fig. 2.16, *b* și 2.16, *c* sînt identice, așa că la construirea zonelor de autoexcitare poate fi folosită oricare dintre ele. Astfel, limita zonei de autoexcitare asincronă, determinată din condițiile de rezonanță, de exemplu în schema reprezentată în fig. 2.16, *b*, corespunde ecuațiilor

$$R=\mathrm{Re}Z_D\,(\omega);$$
$$x_C=(1-s)\mathrm{Im}Z_D(\omega),$$

în care $Z_D(\omega) = j(1 - \omega)x(-j\omega)$.

În acest caz $x(-j\omega)$ este dată de expresiile (2.33) pentru maşina simetrică, adică

$$jx_d(-j\omega) = jx_q(-j\omega) = jx(-j\omega).$$

Expresiile (2.29) s-au obţinut din egalităţile date anterior, iar în relaţia (2.29) s-a considerat că viteza rotorului maşinii asincrone este Ω, diferită de cea sincronă.

În cazurile cînd se analizează autoexcitarea la maşina sincronă, trebuie utilizate schemele statice echivalente reprezentate în fig. 2.17.

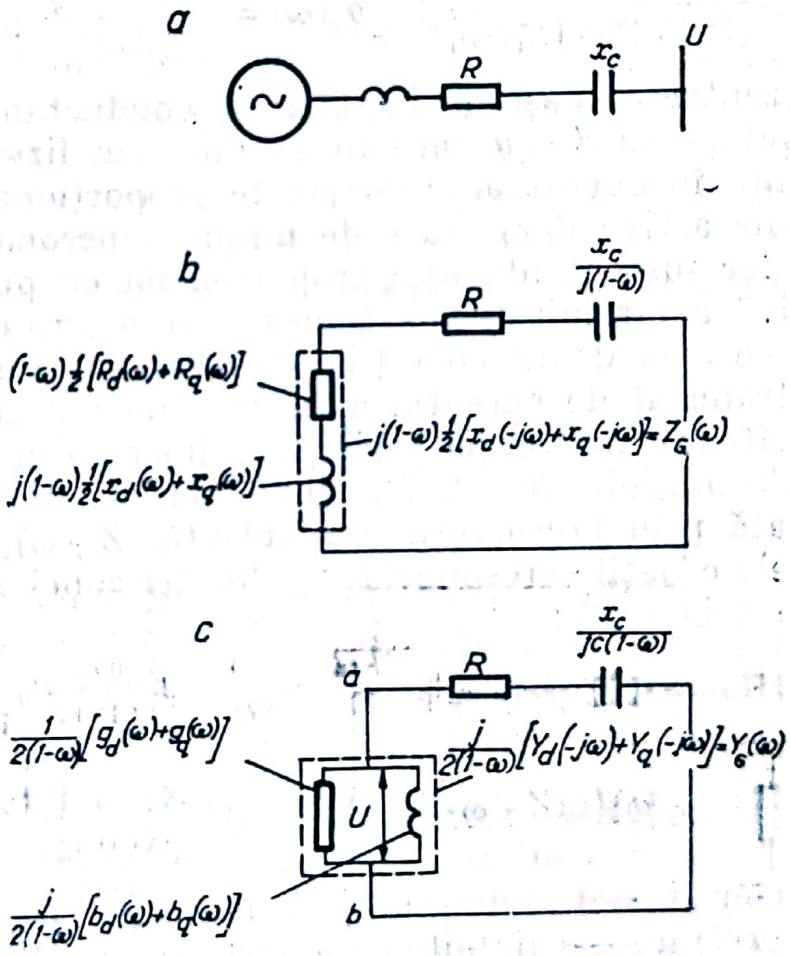


Fig. 2.17. Schemele echivalente cu elemente statice pentru construirea frontierei zonei *III* de autoexcitare a maşinii sincrone cu înfăşurări de amortizare:

a — schema conectării maşinii sincrone; *b* — maşina reprezentată prin impedanţe; *c* — maşina reprezentată prin admitanţe.

Rezistențele, reactanțele și conductanțele echivalente ale mașinii sincrone se deduc astfel:

$$Z_G(\omega)=\frac{1-\omega}{2}[R_d(\omega)+R_q(\omega)]+\frac{j(1-\omega)}{2}[x_d(\omega)+x_q(\omega)];$$

$$Y_G(\omega)=\frac{1}{2(1-\omega)}[g_d(\omega)+g_q(\omega)]+\frac{j}{2(1-\omega)}[b_d(\omega)+b_q(\omega)],$$

unde:

$$q_d(\omega)=\frac{R_d(\omega)}{[R_d(\omega)]^2+[X_q(\omega)]^2};$$

$$g_q(\omega)=\frac{R_q(\omega)}{[R_q(\omega)]^2+[X_q\omega)]^2};$$

$$b_d(\omega)=\frac{X_d(\omega)}{[R_d(\omega)]^2+[X_d(\omega)]^2};\quad b_q(\omega)=\frac{X_q(\omega)}{[R_q(\omega)]^2+[X_q(\omega)]^2}.$$

Reprezentarea mașinii sincrone cu conductanțele medii de-a lungul axelor d și q are un anumit sens fizic, deoarece conductanța în curent alternativ este proporțională cu puterea medie activă dezvoltată de mașina sincronă în regim asincron, iar susceptanța este proporțională cu puterea medie reactivă a mașinii ce funcționează în regim asincron.

După ce s-au dedus condițiile de rezonanță din circuitul electric străbutut de curentul alternativ de pulsația $(1-\omega)$ corespunzătoare frecvenței oscilațiilor libere din circuitele imobile ale mașinii (fig. 2.17), unde mașina sincronă este reprezentată prin impedanța echivalentă $Z_G(\omega)$, obținem următoarele ecuații corespunzătoare limitei zonei *III* de autoexcitare asincronă:

$$R=-\mathrm{Re}Z_G(\omega)=-(1-\omega)\frac{R_d(\omega)+R_q(\omega)}{2}$$

$$x_C=(1-\omega)\mathrm{Im}Z_G(\omega)=(1-\omega)^2\frac{X_d(\omega)+X_q(\omega)}{2}.$$

Dacă considerăm că mașina sincronă cu poli înnecați (turbogeneratorul) nu are circuite de amortizare se obține expresia (2.32) pentru determinarea zonei a *III* de autoexcitare.

La construirea zonei *III* a autoexcitării asincrone se procedează în felul următor: luînd diverse valori pentru ω, de la 0 pînă la -1, ceea ce corespunde regimului de gene-

rator al maşinilor sincrone, determinăm $jx_d(-j\omega)$ şi $jx_q(-j\omega)$; apoi, cu ajutorul egalităţilor corespunzătoare, se deduc valorile mărimilor R şi x_C care limitează zona *III* a autoexcitării.

În majoritatea cazurilor, pentru maşinile înfăşurării de amortizare, metoda expusă de construire a zonei *III* a autoexcitării simplifică calculele, ţine seama de parametrii maşinii sincrone la diverse frecvenţe ale oscilaţiilor libere şi nu dă erori mari.

Trebuie totuşi să remarcăm că folosirea metodei frecvenţelor dă posibilitatea să se găsească suficient de simplu zonele *I*, *II* *III* de autoexcitare în orice sistem şi cu orice grad de complexitate, fără a se deduce ecuaţia caracteristică. Pentru aceasta se utilizează caracteristicile de frecvenţă ale maşinilor sincrone şi asincrone şi de asemenea ale tuturor elementelor statice ce intră în componenţa sistemului. Astfel, conform expresiilor (2.29) şi (2.32) putem obţine zonele complete ale autoexcitării, deci nu numai zona *III*. Însă, deoarece zonele *I* şi *II* de autoexcitare se obţin mult mai simplu prin metodele expuse mai înainte, expresiile (2.29) şi (2.32) se folosesc numai pentru construirea zonei *III* de autoexcitare.

2.5. *Eliminarea autoexcitării maşinilor sincrone cu ajutorul regulatoarelor automate de excitaţie*

Cercetarea condiţiilor funcţionării regulatorului de excitaţie, în scopul prevenirii autoexcitării, se face în baza sistemului de ecuaţii ce cuprinde ecuaţiile procesului tranzitoriu în maşină (sub forma dată de Park-Gorev), în excitatoare şi în regulator.

Procesul tranzitoriu într-o maşină ce debitează prin capacitate şi reactanţă inductivă pe bare de tensiune constantă (fig. 2.18) este exprimat de ecuaţiile (2.1)—(2.3).

Procesul tranzitoriu în excitatoare poate fi dat de ecuaţia

$$\Delta U_E = \Delta U_{fd}(pT_e + 1). \qquad (2.36)$$

Ecuaţia regulatorului depinde de felul reglării excitaţiei maşinii sincrone. În cazul reglării în funcţie de abaterea

Scanned with OKEN Scanner

tensiunii și de derivatele de ordinele I și II ale acesteia ecuația regulatorului are expresia

$$\Delta U_E = -\left[\frac{1}{pT_p+1}\left\{\frac{K_{0U}}{pT_{p0}+1}+\frac{pK_{1U}}{pT_{p1}+1}+\right.\right.$$
$$\left.\left.+\frac{p^2K_{2U}}{(pT_{p1}+1)^2}\right\}\right]\Delta U_G, \qquad (2.37)$$

în care K_{0U}, K_{1U}, K_{2U}, sînt factorii globali de amplificare a întregului sistem de reglaj, corespunzători abaterii tensiunii și derivatelor de ordinele I și II ale acesteia.

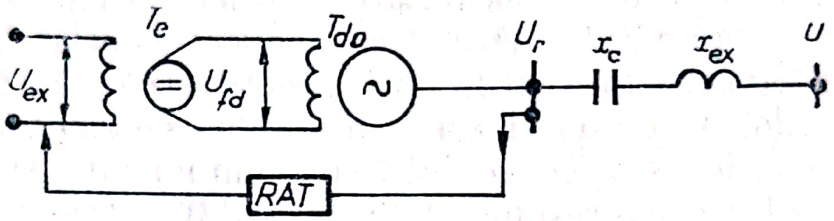


Fig. 2.18. Sistemul „mașină sincronă reglabilă—capacitate—bare de tensiune constantă".

Rolul regulatorului de excitație constă în eliminarea autoexcitării în primul stadiu al ei și de aceea în ecuațiile (2.1) putem neglija schimbarea vitezei de rotație a rotorului ($p\gamma = 1$). Neglijînd de asemenea în aceste ecuații termenii ce țin seama de rezistența statorului, se obține următorul sistem de ecuații:

$$\left.\begin{aligned}&[x_d(p) - p^2x_d(p) - x_C]\Delta i_d - 2px_q(p)\Delta i_q + \\ &\quad + [G(p) - p^2G(p)]\Delta U_{fd} = 0;\\ &-2px_d(p)\Delta i_d + [p^2x_q(p) - x_q(p) - \\ &\quad - x_C]\,\Delta i_q + 2pG(p)\,\Delta U_{fd} = 0.\end{aligned}\right\} \qquad (2.38)$$

Ecuațiile (2.36) — (2.38) sînt scrise pentru cazul abaterii mărimilor variabile și caracterizează procesele tranzitorii electromagnetice ale circuitelor statorului și rotorului mașinii, excitatoarei și regulatorului.

Variația tensiunii la bornele mașinii sincrone se poate exprima în funcție de componentele de pe axele d și q

$$\Delta U_G = \frac{U_{Gq0}}{U_{G0}}\,\Delta U_{Gq} + \frac{U_{Gd0}}{U_{G0}}\,\Delta U_{Gd}, \qquad (2.39)$$

unde U_{G0}, U_{Gq0}, U_{Gd0} sînt valorile în regimul inițial neperturbat.

În cazul cînd mașina funcționează fără sarcină și nu se ia în considerare nici rezistența, $U_{Gd0} = 0$, $\frac{U_{Gq0}}{U_{G0}} = 1$, adică

$$\Delta U_G = \Delta U_{Gq}. \tag{2.40}$$

Componenta transversală a tensiunii ΔU_{Gq} și variabilele Δi_d, Δi_q și ΔU_{fd} sînt legate prin relația

$$\Delta U_{Gq} = -p\Delta\psi_{1q} + \Delta\psi_{1d}, \tag{2.41}$$

în care:

$$\Delta\psi_{1q} = x_q(p)\Delta i_q;$$
$$\Delta\psi_{1d} = G(p)\Delta U_{fd} + x_d(p)\Delta i_d.$$

Ecuațiile (2.37) — (2.41) permit deducerea ecuației caracteristice în cazul cînd se neglijează elementele de întîrziere și de diferențiere în regulator, sub forma unui polinom de gradul șapte în raport cu operatorul p:

$$a_0p^7 + a_1p^6 + a_2p^5 + a_3p^4 + a_4p^3 + a_5p^2 + \\ + a_6p + a_7 = 0. \tag{2.42}$$

În cazul cînd toți parametrii sistemului sînt liniari, autoexcitarea corespunde din punct de vedere matematic apariției în ecuația (2.42) a rădăcinilor cu partea reală pozitivă. În acest caz, așa după cum s-a indicat anterior, în zona autoexcitării sincrone apare o singură rădăcină reală pozitivă, în timp ce în zona autoexcitării asincrone apar două rădăcini complexe conjugate cu partea reală pozitivă.

Condiția necesară ca să nu existe rădăcini cu partea reală pozitivă pentru ecuația caracteristică de orice grad este reprezentată prin condiția ca toți coeficienții săi să fie pozitivi. Dacă se consideră că în legea de reglaj nu intră derivate ale mărimilor reglabile ($K_{1U} = K_{2U} = 0$) și dacă se neglijează elementul de întîrziere în regulator ($T_p = 0$), trebuie analizați, doar coeficienții a_5, a_6 și a_7 din ecuația (2.42), deoarece restul sînt în esență mărimi pozitive pentru orice valori ale parametrilor componenți.

Scanned with OKEN Scanner

Condiția $a_6 \geqslant 0$ determină valorile necesare ale constantelor de timp T_e a excitatoarei, iar condițiile $T_5 \geqslant 0$ și $a_7 \geqslant 0$ determină valorile factorului de amplificare K_{0U}. În fig. 2.19 sînt reprezentate curbele pentru valorile limită ale

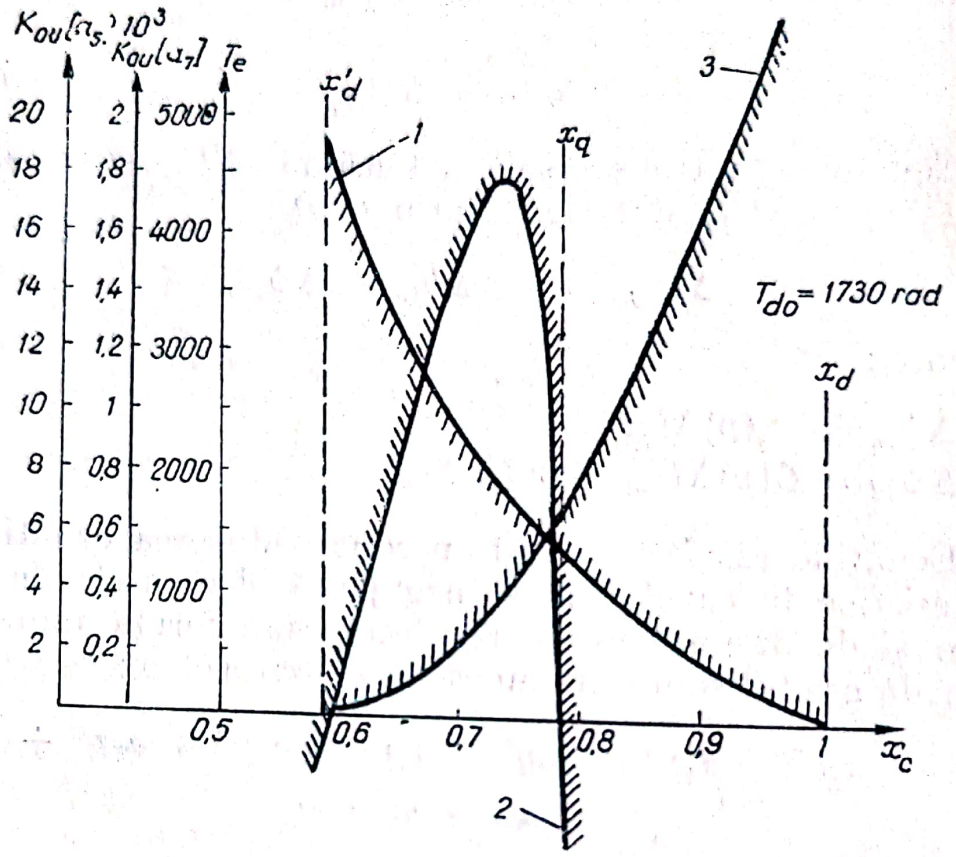


Fig. 2.19. Valorile limită ale factorului de amplificare K_{0U} și ale constantei de timp T_e la care coeficienții a_5, a_6, a_7 sînt egali cu zero: 1 — $K_{0U}[a_7]$; 2 — $K_{0U}[a_5]$; 3 — $T_e[a_6]$.

lui T_e și K_{0U}, la care a_5, a_6 și a_7 devin nuli. Din fig. 2.19 se vede[1]) că este satisfăcută practic, la orice valori ale factorilor de amplificare K_{0U}, și ale constantei de timp T_e a excitatoarei, condiția ca în ecuația (2.42) coeficienții să fie pozitivi în zona autoexcitării sincrone.

Pentru a se verifica condițiile suficiente de eliminare a autoexcitării prin reglarea excitației mașinii sincrone trebuie să se determine domeniile de funcționare stabilă în coordonatele K_{0U} și T_e. Construirea domeniilor de stabili-

---

[1]) Direcția de hașurare a curbelor din fig. 2.19 corespunde valorii pozitive a coeficienților.

tate este recomandabil să se facă folosind metoda divizării. Pentru zona autoexcitării sincrone se obține domeniul stabil (eliminarea autoexcitării) la o gamă suficient de mare a variației lui K_{0U} și T_e, iar mărirea constantei de timp T_{d0}

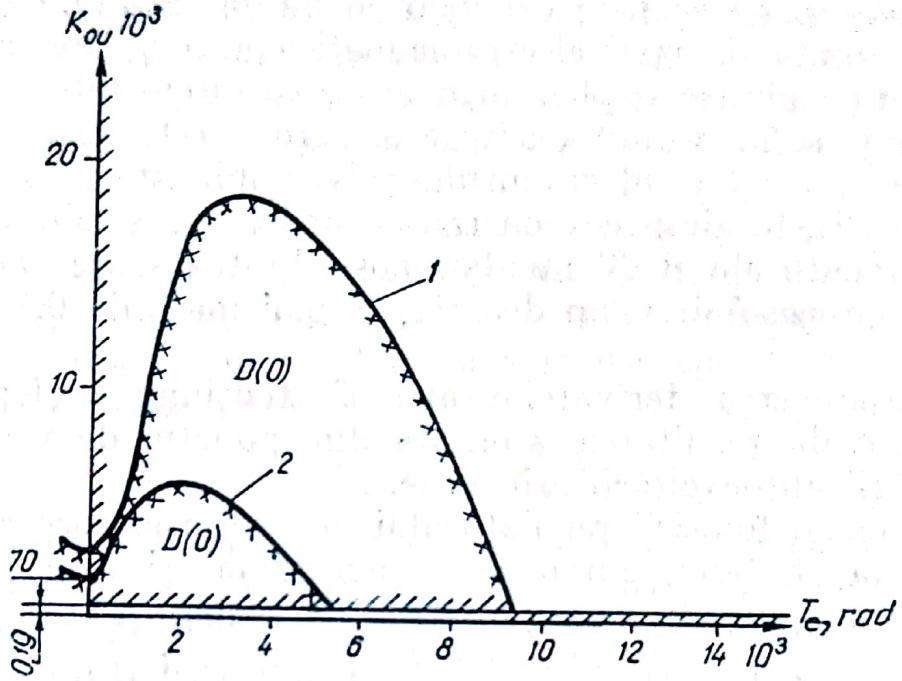


Fig. 2.20. Variația domeniului de stabilitate a reglării în zona *I* cu creșterea constantei de timp T_{d0} pentru $T_p = 0$; $x_C = 0{,}9$;
1 — $T_{d0} = 2$ s; *2* — $T_{d0} = 1$ s.

lărgește domeniul de funcționare stabil (fig. 2.20). Luînd în considerare și constanta de timp T_p a regulatorului, obținem ca valori admisibile ale factorului K_{0U} valori practice.

Analiza arată că eliminarea autoexcitării în zona asincronă nu ridică cerințe deosebite pentru funcționarea regulatorului de excitație.

Necesitatea ca în ecuația caracteristică coeficienții a_5 și a_7 să fie pozitivi în zona autoexcitării asincrone este în contradicție cu dezideratul alegerii valorilor factorului de amplificare K_{0U} în raport cu abaterea tensiunii. Inegalitățile $a_5 > 0$ și $a_7 > 0$ pot fi satisfăcute numai în apropierea frontierei domeniului corespunzător, pentru $x_C \approx x_q$ și $x_C \approx x'_d$. Valorile maxime ale factorilor de amplificare K_{0U} sînt determinate în acest caz de condiția $a_7 > 0$ și rezultă destul de

tenţa alunecării între cîmpurile învîrtitoare ale statorului şi rotorului. Divizarea autoexcitării în sincronă şi asincronă s-a făcut în concordanţă cu caracterul manifestării în apropierea frontierei zonei. Acest lucru se reflectă matematic prin deplasarea unui anumit număr de rădăcini din semiplanul stîng de variabilă complexă p, în semiplanul drept. De exemplu, condiţia $a_5 = 0$ [unde a_5 este termenul liber al ecuaţiei caracteristice (2.6)], ce determină domeniul autoexcitării sincrone, corespunde deplasării uneia dintre rădăcinile din stînga în semiplanul din drepta prin originea axelor de coordonate, în care caz alunecarea dintre cîmpurile statorului şi rotorului este nulă. Relaţia $\Delta_4 = 0$ [unde Δ_4 este penultimul determinant Hurvitz al ecuaţiei caracteristice (2.6)] ce determină domeniul autoexcitării asincrone corespunde trecerii unei perechi de rădăcini din stînga prin axa imaginară în care caz în sistem apare o alunecare a cărei mărime este determinată de componenta imaginară a rădăcinilor complexe. Modul cum se dezvoltă autoexcitarea în apropierea frontierei nu se extinde şi asupra felului cum aceasta se dezvoltă în interiorul domeniului.

În interiorul zonei autoexcitării asincrone $x'_d < x_C < x_q$ se poate separa un domeniu între limitele căruia rădăcinile complexe tind spre două rădăcini multiple reale. Această zonă din interiorul domeniului autoexcitării asincrone se numeşte uneori *autoexcitarea repulsivă sincronă*. Întrucît autoexcitarea repulsivă sincronă nu se distinge aproape deloc de autoexcitarea asincronă, nici după indicaţiile aparatelor şi nici după manifestarea exterioară sau după aspectul oscilogramelor, delimitarea unei asemenea zone a autoexcitării repulsive sincrone nu constituie practic o necesitate. Totuşi, separarea acestei zone nu este lipsită de interes întrucît ea ajută la aprofundarea deducţiei matematice şi a fizicii procesului din care cauză ne vom opri mai mult asupra ei.

Studiul procesului de autoexcitare se reduce la analiza ecuaţiei caracteristice

$$D(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \ldots + a_{n-1} p + a_n = 0. \quad (2.44)$$

Numărul rădăcinilor reale, din partea dreaptă a planului, a ecuaţiei caracteristice (2.44) poate fi determinat folosind teorema lui Sturm, conform căreia numărul rădăcinilor

reale din partea dreaptă este identic egal cu numărul schimbărilor de semn ale variabilelor în șirul lui Sturm [1]. Întrucît folosind această metodă la determinarea zonei autoexcitării repulsive sincrone sînt necesare calcule laborioase, este indicată o metodă numerică de determinare a frontierei acestei zone bazată pe considerațiile teoretice expuse anterior.

Pe frontiera autoexcitării repulsive sincrone există o pereche de rădăcini multiple reale. Se știe că perechea de rădăcini complexe poate apărea sau dispărea la deplasarea punctului reprezentativ din planul celor doi parametri variabili (x_C și R) numai cu condiția tinderii în prealabil spre o rădăcină reală dublă $p = h$. Acest lucru poate avea loc numai în acele puncte unde ecuațiile

$$D(p) = 0, \quad D'(p) = 0 \tag{2.45}$$

au rădăcinina comună $p = h$.

La calculul frontierei autoexcitării repulsive sincrone a mașinii cu poli aparenți fără înfășurări de amortizare (fig. 2.1) ecuațiile (2.45) pot fi scrise în felul următor:

$$\begin{aligned} &aR^2 + bR + c = 0; \\ &\frac{da}{dp} R^2 + \frac{db}{dp} R + \frac{dc}{dp} = 0. \end{aligned} \tag{2.45 a}$$

Coeficienții care intră în expresiile de mai sus au forma:

$$a = (p^2 + 1)(T_{d0}p + 1);$$

$$b = T_{d0}(x'_d + x_q)\, p^2(p^2 + 1) + (x_q + x_d)\, p(p^2 + 1) + 2x_C p(T_{d0}p + 1);$$

$$c = x'_d x_q T_{d0} p(p^2 + 1)^2 + x_d x_q (p^2 + 1)^2 + x_C T_{d0} p(x'_d + x_q)(p^2 - 1) + x_C(x_d + x_q)(p^2 - 1) + x_C(T_{d0}p + 1).$$

---

[1]) Determinarea numărului de rădăcini reale în partea dreaptă a planului și prin urmare și a caracterului procesului din domeniul analizat poate fi făcută aproximativ cu ajutorul șirului generalizat Lagrange.

Scanned with OKEN Scanner

Diferențiind obținem:

$$\frac{da}{dp} = 3T_{d0}p^2 + 2p + T_{d0};$$

$$\frac{db}{dp} = 4T_{d0}(x'_d + x_q)\,p^3 + 3(x_d + x_q)p^2 + 2[T_{d0}(x'_d + x_q) + $$
$$+ 2T_{d0}x_C]\,p + [(x_d + x_q) + 2x_C];$$

$$\frac{dc}{dp} = 5x'_d x_q T_{d0}p^4 + 4x_d x_q p^3 + 3[2x'_d x_q T_{d0} + x_C T_{d0}(x'_d +$$
$$+ x_q)]\,p^2 + 2[2x_d x_q + x_C(x_d + x_q)]\,p + [x'_d x_q T_{d0} -$$
$$- T_{d0}x_C(x'_d + x_q) + T_{d0}x_C^2].$$

După transformările respective în sistemul de ecuații (2.45) se pot scrie expresiile ce determină valoarea rezistenței R pentru o mărime oarecare x_C la limita autoexcitării repulsive sincrone:

$$R = \frac{a\dfrac{dc}{dp} - c\dfrac{da}{dp}}{b\dfrac{da}{dp} - a\dfrac{db}{dp}}; \qquad R^2 = \frac{b\dfrac{dc}{dp} - c\dfrac{db}{dp}}{a\dfrac{db}{dp} - b\dfrac{da}{dp}}. \tag{2.46}$$

La efectuarea calculelor pentru construirea limitei autoexcitării sincrone pe baza relațiilor (2.46) se recomandă următoarea succesiune:

— se ia o valoare oarecare x_C între limitele $x'_d < x_C < x_q$. Pentru mărimea adoptată x_C se consideră o serie de rădăcini pozitive reale $p = h$, și anume h va trebui să varieze de la $0{,}01(x_C \approx x_q)$ pînă la $0{,}1$ $(x_C \approx x'_d)$ în unități relative;

— se calculează valorile a, b, c și derivatele lor. Apoi se determină R și R^2 cu ajutorul relațiilor (2.46) pentru fiecare valoare dată a lui h;

— se construiesc curbele R și R^2 în funcție de h. Punctul de intersecție al acestor curbe dă punctul limită al zonei. Dînd diverse valori lui x_C se poate determina întreaga zonă a autoexcitării repulsive sincrone.

Cînd $R = 0$ este necesară o regrupare a ecuației caracteristice (2.44) după altă mărime, deosebită de R, cum s-a

făcut anterior, și anume după x_C. Condiției de rădăcini multiple în ecuația caracteristică (2.44) îi corespunde acum sistemul de ecuații:

$$Lx_C^2 + Mx_C + N = 0;$$

$$\frac{dL}{dp} x_C^2 + \frac{dM}{dp} x_C + \frac{dN}{dp} = 0,$$

în care coeficienții au valorile:

$$L = T_{d0}p + 1;$$

$$M = T_{d0}(x'_d + x_q)\, p^3 + (x_d + x_q)\, p^2 - T_{d0}(x'_d + x_q)\, p - (x_d + x_q);$$

$$N = x'_d x_q T_{d0} p^5 + x_d x_q p^4 + 2x'_d x_q T_{d0} p^3 + 2x_d x_q p^2 + x'_d x_q T_{d0} p + x_d x_q;$$

$$\frac{dL}{dp} = T_{d0}; \quad \frac{dM}{dp} = 3T_{d0}(x'_d + x_q)\, p^2 + 2(x_d + x_q)\, p - T_{d0}(x'_d + x_q);$$

$$\frac{dN}{dp} = 5x'_d x_q T_{d0} p^4 + 4x_d x_q p^3 + 6x'_d x_q T_{d0} p^2 + 4x_d x_q p + T_{d0} x'_d x_q.$$

Ecuațiile pentru determinarea valorilor limită x_C sînt:

$$x_C = \frac{L\dfrac{dN}{dp} - N\dfrac{dL}{dp}}{M\dfrac{dL}{dp} - L\dfrac{dM}{dp}}; \quad \frac{dL}{dp} x_C^2 + \frac{dM}{dp} x_C + \frac{dN}{dp} = 0.$$

Se recomandă să se efectueze calculele în aceeași succesiune indicată anterior. La $R = 0$ există două valori limită pentru x_C dintre care una este totdeauna egală cu x_q, iar cealaltă este totdeauna mai mare decît x'_d.

Frontiera autoexcitării repulsive sincrone, construită după metoda menționată, este reprezentată în fig. 2.21, unde se vede că domeniul autoexcitării repulsive sincrone se mărește cu creșterea constantei de timp T_{d0}. Cînd $T_{d0} = \infty$, domeniul

autoexcitării repulsive coincide cu întregul domeniu *II* al autoexcitării unde $x'_d < x_C < x_q$.

Prin urmare, dacă înfăşurarea de excitaţie este supraconductoare, autoexcitarea din domeniul $x'_d < x_C < x_q$ se dezvoltă pe seama puterii reactive a maşinii sincrone în caz că există nesimetrie de-a lungul axelor în rotor. Dacă înfăşurarea de excitaţie are rezistenţă finită (nesupraconductoare şi deci $T_{d0} \neq \infty$), autoexcitarea repulsivă sincronă se poate dezvolta numai la creşterea continuă a curentului de excitaţie care compensează amortizarea oscilaţiilor libere în înfăşurarea de excitaţie. De aceea, domeniul autoexcitării repulsive sincrone este totdeauna mai mic decît domeniul *II* al autoexcitării ($x'_d < x_C < x_q$) pentru valorile obişnuite ale lui T_{d0}. Totuşi, după cum se vede din calcule, domeniul autoexcitării repulsive sincrone a maşinii sincrone cu parametrii reali ocupă o parte mare din zona *II* de autoexcitare ($x'_d < x_C < x_q$). Prin urmare, se poate considera că în acest domeniu autoexcitarea în cazul înfăşurării supraconductoare de excitaţie se dezvoltă mai ales datorită puterii reactive a maşinii sincrone (datorită cuplului dinamic de reacţie).

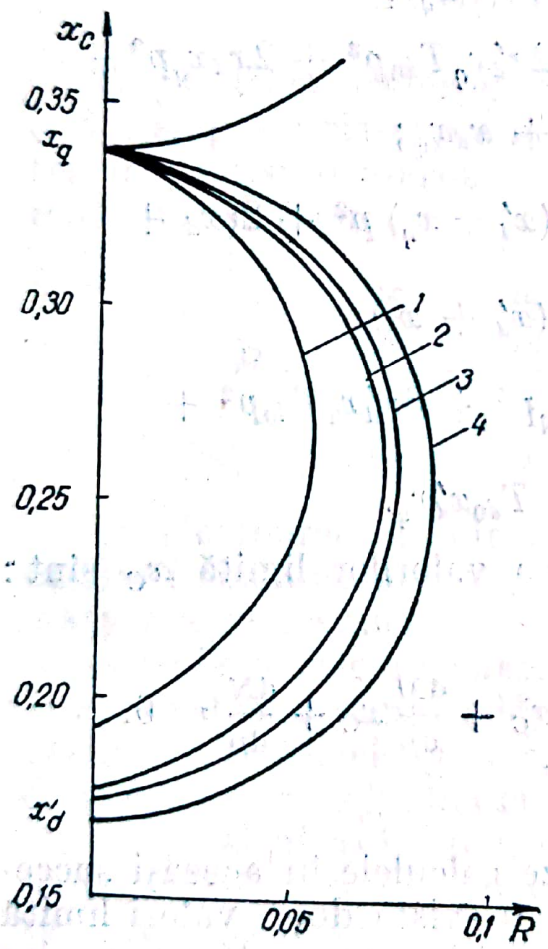


Fig. 2.21. Frontiera zonei de autoexcitare repulsivă sincronă pentru diverse valori ale constantei de timp T_{d0}:
1 — $T_{d0} = 1$ s; 2 — $T_{d0} = 5{,}5$ s; 3 — $T_{d0} = 10$ s; 4 — $T_{d0} = \infty$.

La determinarea zonei de autoexcitare repulsivă sincronă pentru maşinile cu înfăşurări de amortizare se mai pot folosi şi relaţiile care leagă x_C şi R, date mai sus, însă coeficienţii a, b, c, L, M, N şi derivatele lor se găsesc în acest caz din ecuaţia caracteristică (2.17) pentru maşina cu înfăşurări de amortizare.

CAPITOLUL 3

Autopendularea în sistemul simplu

3.1. *Verificarea la autopendulare a generatoarelor fără înfăşurări de amortizare*

Studierea analitică a autopendulării, în scopul determinării probabilităţilor de apariţie a instabilităţii periodice a generatoarelor unui sistem electric simplu, se poate face pe baza ecuaţiilor diferenţiale Park-Gorev liniarizate în punctul regimului iniţial. Ecuaţiile Park-Gorev caracterizează complet procesul tranzitoriu din sistem. Pentru sistemul simplu „centrală fără reglaj—bare de tensiune constanta" (fig. 3.1) neconsiderînd înfăşurările de amortizare, ecuaţiile liniare au forma :

$$\left.\begin{aligned}
&p\Delta\psi_d + \Delta\psi_q + R\Delta i_d + (\psi_{q0}p - U\cos\delta_0)\Delta\delta = 0;\\
&\Delta\psi_d - p\Delta\psi_q - R\Delta i_q + (\psi_{d0}p + U\sin\delta_0)\Delta\delta = 0;\\
&T_J p^2\Delta\delta + i_{q0}\Delta\psi_d - i_{d0}\psi_q - \psi_{q0}\Delta i_d + \psi_{d0}\Delta i_q = 0\\
&\Delta\psi_d = \frac{x'_{d\Sigma}T_{d0}\,p + x_{d\Sigma}}{T_{d0}\,p + 1}\,\Delta i_d;\\
&\Delta\psi_q = x_{q\Sigma}\,\Delta i_q.
\end{aligned}\right\} \quad (3.1)$$

Ecuaţia caracteristică corespunzătoare este de gradul cinci

$$a_0p^5 + a_1p^4 + a_2p^3 + a_3p^2 + a_4p + a_5 = 0 \quad (3.2)$$

Scanned with OKEN Scanner

cu următoarele expresii pentru coeficienţi:

$$a_0 = T_J T_{d0} x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}\,; \quad a_1 = T_J[x_{d\Sigma} x_{q\Sigma} + T_{d0} R(x'_{d\Sigma} + x_{q\Sigma})]\,;$$

$$a_2 = T_J[R(x_{d\Sigma} + x''_{q\Sigma}) + T_{d0}(x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma} + R^2)] +$$

$$+ T_{d0}\left\{x'_{d\Sigma} E_{q0}\left[\frac{E_{q0}}{z_{q\Sigma}} \sin \alpha_{11Q} + x_{q\Sigma} \frac{U}{z_{q\Sigma}} \cos(\delta_0 - \alpha_{11Q})\right] + \right.$$

$$\left. + x^2_{q\Sigma}(x_{q\Sigma} - x'_{d\Sigma})\left[\frac{E_{q0}}{z_{q\Sigma}} \sin \alpha_{11Q} + \frac{U}{z_{q\Sigma}} \sin(\delta_0 - \alpha_{11Q})\right]^2\right\}$$

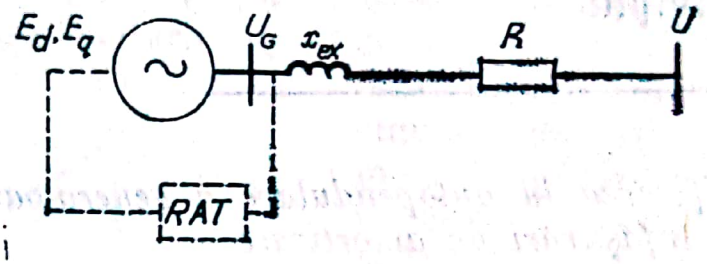


Fig. 3.1. Sistemul „centrală nereglabilă — bare de tensiune constantă".

$$a_3 = T_J(x_{d\Sigma} x_{q\Sigma} + R^2) + T_{d0}\left\{\left[(R^2 - x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}) \frac{E^3_{q0}}{z_{q\Sigma}} \sin \alpha_{11Q} + \right.\right.$$

$$\left. + R(x'_{d\Sigma} + x_{q\Sigma}) \frac{E_{q0} U}{z_{q\Sigma}} \cos(\delta_0 - \alpha_{11Q})\right] + 2(x_{q\Sigma} - x'_{d\Sigma}) R x_{q\Sigma} \times$$

$$\left. \times \left[\frac{E_{q0}}{z_{q\Sigma}} \sin \alpha_{11Q} + \frac{U}{z_{q\Sigma}} \sin(\delta_0 - \alpha_{11Q})\right]\right\} +$$

$$+ \left\{x_{d\Sigma} E_{q0}\left[R \frac{E_{q0}}{z_{q\Sigma}} \sin \alpha_{11Q} + x_{q\Sigma} \times \right.\right.$$

$$\left. \times \frac{U}{z_{q\Sigma}} \cos(\delta_0 - \alpha_{11Q})\right] - x^2_{q\Sigma}(x_{d\Sigma} - x_{q\Sigma})\left[\frac{E_{q0}}{z_{q\Sigma}} \sin \alpha_{11Q} + \right.$$

$$\left.\left. + \frac{U}{z_{q\Sigma}} \times \sin(\delta_0 - \alpha_{11Q})\right]^2\right\};$$

$$a_4 = T_{d0}(x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma} + R^2) S_{E'd} +$$

$$+ \left[(R^2 - x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}) \frac{E^2_{q0}}{z_{q\Sigma}} \sin \alpha_{11Q} + R(x_{d\Sigma} + x_{q\Sigma}) \times \right.$$

$$\times \frac{E_{q0}U}{z_{q\Sigma}} \cos(\delta_0 - \alpha_{11Q})\Big] - 2x_{q\Sigma}(x_{d\Sigma} - x_{q\Sigma})R \times$$

$$\times \left[\frac{E_{q0}}{z_{q\Sigma}} \sin \alpha_{11Q} + \frac{U}{z_{q\Sigma}} \sin(\delta_0 - \alpha_{11Q})\right]^2;$$

$$a_5 = (x_{d\Sigma} x_{q\Sigma} + R^2) S_{Ed}; \qquad (3.2a)$$

unde

$$S_{Ed} = \frac{E_q U}{z_{q\Sigma}} \cos(\delta - \alpha_{11Q}) - \frac{x_{d\Sigma} - x_{q\Sigma}}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma} + R^2} \times$$

$$\times [2E_q \sin \alpha_{11Q} + U \sin(\delta - \alpha_{11Q})] U \sin(\delta - \alpha_{11Q}),$$

$$S_{E'd} = \frac{E_q U}{z_{q\Sigma}} \cos(\delta - \alpha_{11Q}) - \frac{x'_{d\Sigma} - x_{q\Sigma}}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma} + R^2} \times$$

$$\times [2E_q \sin\alpha_{11Q} + U \sin(\delta - \alpha_{11Q})] U \sin(\delta - \alpha_{11Q}),$$

$$S_{UGd} = \frac{E_q U}{z_{q\Sigma}} \cos(\delta - \alpha_{11Q}) + \frac{x_q}{x_{ex} x_{q\Sigma} + R^2} \times$$

$$\times [2E_q \sin \alpha_{11Q} + U \sin(\delta - \alpha_{11Q})] U \sin(\delta - \alpha_{11Q}),$$

$$\left.\begin{aligned} T'_d &= T_{d0} \frac{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma} + R^2}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma} + R^2}, \quad z_q = \sqrt{x_{q\Sigma}^2 + R^2}, \\ \alpha_{11Q} &= \operatorname{arc\,tg} \frac{R}{x_{q\Sigma}}. \end{aligned}\right\}$$

În cazul dat cel mai simplu se poate deduce domeniul autoexcitării folosind criteriul Routh care, pentru ecuația (3.2), este dat în tabelul 3.1.

Domeniile autopendulării se calculează în următoarea succesiune:

— Se fixează doi parametri care trebuie să varieze (în cazul dat este mai comod să fie considerați E_q și δ) și se calculează apoi coeficienții ecuației caracteristice a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, în funcție de E_q și δ.

— Dînd o serie de valori lui δ pentru mărimea neschimbată E_q se completează tabelul 3.1. Primul care tinde spre zero și devine negativ este termenul C_{15}. După ce s-a construit curba $C_{15} = f(\delta)$ și găsind punctul ei de intersecție cu axa absciselor se obține valoarea limită pentru δ corespunzătoare valorii alese E_q.

Tabelul 3.1

—	a_0	a_2	a_4
—	a_1	a_3	a_5
$\lambda_1 = \frac{a_0}{a_1}$	$C_{13} = a_2 - \lambda_1 a_3$	$C_{23} = a_4 - \lambda_1 a_5$	—
$\lambda_2 = \frac{a_1}{C_{13}}$	$C_{14} = a_3 - \lambda_2 C_{23}$	a_5	—
$\lambda_3 = \frac{C_{13}}{C_{14}}$	$C_{15} = C_{23} - \lambda_3 a_5$	—	—
—	a_5	—	—

— Luînd mai multe valori pentru E_q se repetă calculele de la punctul doi.

Astfel, obținem domeniul autopendulării mașinei sincrone în coordonatele E_q și δ (fig. 3.2) avînd neschimbați ceilalți parametri ai sistemului. Mărimea domeniului autopendulării depinde de o serie de factori.

Creșterea rezistenței sistemului extinde domeniul posibil al autopendulării generatoarelor. Trebuie să se remarce totuși că toate calculele legate de deducerea domeniilor de autopendulare a generatoarelor trebuie să fie făcute ținîndu-se seama și de rezistența sistemului. În cazul că nu se ține seama de rezistență în schema echivalentă a sistemului considerat, ecuația caracteristică (3.2) degenerează în ecuația de gradul trei

$$x_{d\Sigma} x_{q\Sigma} (p^2 + 1)[T_J T'_d p^3 + T_J p^2 + T'_d S_{E'd} p + S_{Ed}] = 0. \tag{3.3}$$

Din analiza ecuației (3.3) se remarcă că la sarcini mici, toți coeficienții acestei ecuații sînt pozitivi la fel ca și în ecuația (3.2); în plus se poate scrie și relația

$$\Delta_2 = T_J T'_d \frac{(x_d - x'_d)\, U^2 \sin^2 \delta}{x'_{d\Sigma}\, x_{d\Sigma}\, x_{q\Sigma}} \geqslant 0 \tag{3.4}$$

care este pozitivă la toate valorile unghiului δ.

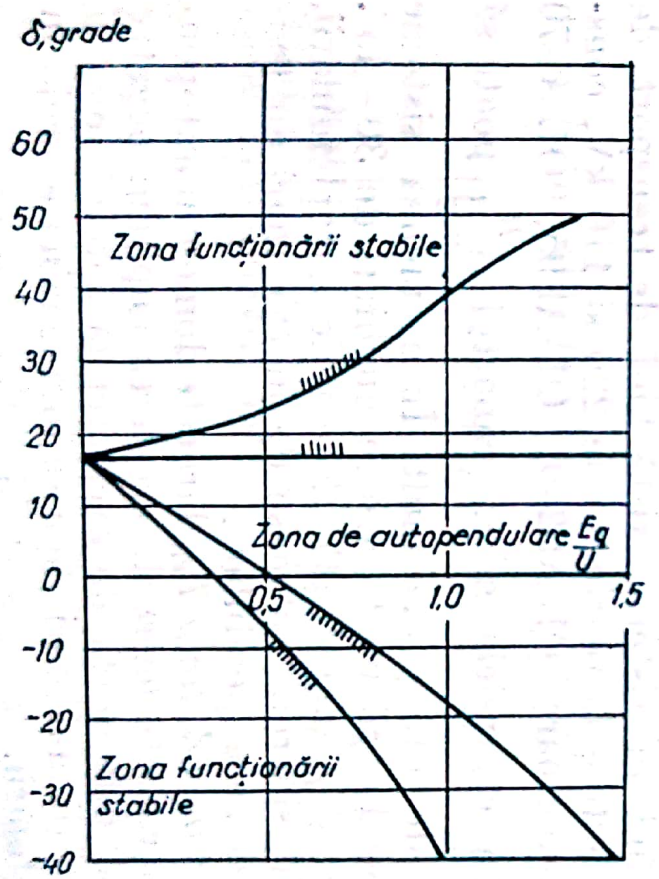


Fig. 3.2. Domeniul autopendulării mașinii sincrone la $T_J = 14{,}4$ s,

$$T_{d0} = 5{,}5 \text{ s}; \frac{R}{x_{q\Sigma}} = 0{,}296:$$

curbele din interior — fără considerarea proceselor tranzitorii din stator;
curbele extreme — cu considerarea lor,

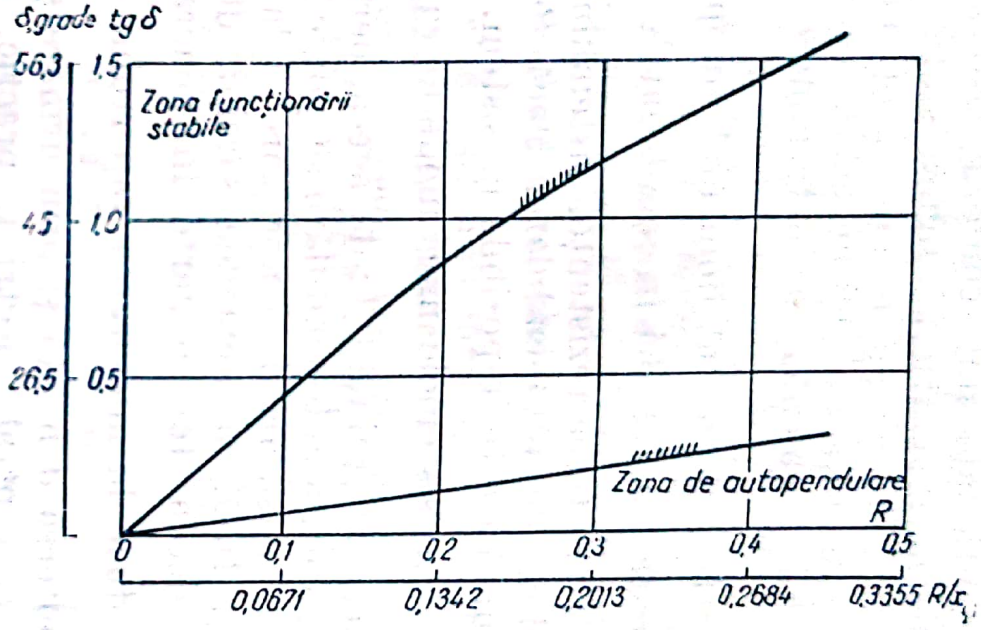


Fig. 3.3. Domeniul autopendulării în coordonatele $\frac{R}{x_{q\Sigma}}$, δ

$$\frac{E_q}{U} = 1; \; T_J = 6{,}25 \text{ s}; \; T_{d0} = 5{,}5 \text{ s}; \; x_{q\Sigma} = 1{,}49$$

curba inferioară — fără a considera procesele tranzitorii din stator;
curba superioară — luînd în considerare și procesele tranzitorii.

Scanned with OKEN Scanner

Condițiile menționate sînt, conform criteriului Hurvitz, necesare și suficiente pentru a asigura stabilitatea generatoarelor în toate regimurile posibile de funcționarea lor. Așadar, nu se poate renunța în nici un caz la rezistența R din schema sistemului în calculele de determinare a domeniilor autopendulării.

În fig. 3.3 este reprezentat domeniul autopendulării sistemului reprezentat în fig. 3.1 în coordonatele $\frac{R}{x_{q\Sigma}}$, δ. Din fig. 3.3 reiese că creșterea rezistenței sistemului duce la lărgirea zonei posibile de autopendulare. Dacă R este egal cu zero, autopendularea este imposibilă în sistem.

Menționăm că în sistemele mari moderne raportul $\frac{R}{x_{q\Sigma}}$ reprezintă o valoare de ordinul 0,1; de aceea, perturbarea stabilității statice datorită autopendulării se poate întîlni numai la mașinile fără înfășurări de amortizare și la sarcini mici ($\delta \leqslant 20 - 25°$). Însă, la asemenea sarcini, de obicei este economic să se deconecteze o parte din generatoarele centralei, fapt ce duce la micșorarea raportului $\frac{R}{x_{q\Sigma}}$. Astfel, crește relativ puterea debitată și prin urmare și unghiul δ. Așadar, reiese că centrala electrică, practic, funcționează totdeauna în afara zonei autopendulării.

În sistemele mici, unde rezistența are valoare mai mare, este posibilă apariția autopendulării la sarcini mici. De exemplu, în cazul cînd în sistem există linii de transport de energie de mică putere la tensiunea de 220 și 110 kV, construirea cu conductoare OL-Al-240, OL-Al-95, OL-Al-70 etc., care leagă centralele mici, raportul $\frac{R}{x_{q\Sigma}}$ poate să atingă valoarea de 0,15 și mai mult. În asemenea sisteme domeniul autopendulării poate atinge unghiuri de 30—45°.

Mărimea lui T_J îngustează domeniile autopendulării, deoarece mașinile sincrone cu mase de inerție mari au tendință mai redusă spre pendulare.

Creșterea constantei de timp T_{d0} lărgește domeniul autopendulării. Acest lucru este legat de creșterea cuplului negativ de amortizare a înfășurării de excitație la sarcini mici și datorită posibilității mai mari de a se înmagazina energia în timpul autopendulării.

Scanned with OKEN Scanner

Existența compensării longitudinale capacitive la liniile lungi de transport de energie, extinde domeniul autopendulării generatoarelor, întrucît existența acestei compensări duce la creșterea raportului între rezistență și reactanța sistemelor.

Creșterea excitării mașinii sau micșorarea tensiunii la stația de capăt a sistemului extinde domeniul autopendulării generatoarelor centralei debitoare. Este indicat ca domeniile de autopendulare a generatoarelor să fie deduse nu în funcție de valorile absolute ale lui E_q și U, ci în funcție de raportul $\frac{E_q}{U}$ întrucît se reduce apreciabil volumul calculelor.

Este cazul să ne oprim în mod special asupra considerării proceselor tranzitorii din stator în calculul domeniului autopendulării generatoarelor din sistemele electrice, întrucît acestea îl lărgesc în mod substanțial. Condițiile apariției autopendulării în schema „centrală-bare" fără considerarea proceselor tranzitorii din stator se deduc din analiza ecuațiilor diferențiale ale sistemului care cu aproximațiile adoptate au forma:

$$\left.\begin{aligned} &T_J p^2 \Delta\delta + \Delta P = 0; \\ &\Delta P = S_{Ed}\Delta\delta + P'_{Ed}\,\Delta E_d; \\ &\Delta P = S_{E'd}\,\Delta\delta + P'_{E'd}\,\Delta E'_d, \\ &T_{d0}\, p\Delta E'_d + \Delta E_d = 0. \end{aligned}\right\} \qquad (3.5)$$

Ecuația caracteristică (3.5) a sistemului este

$$T_J T'_d\, p^3 + T_J p^2 + T'_d\, S_{E'd} p + S_{Ed} = 0. \qquad (3.6)$$

La sarcini mici ale generatorului sincron toți coeficienții ecuației caracteristice (3.6) sînt pozitivi, iar penultimul determinant Hurvitz este

$$\Delta_2 = T_J T'_d\,(S_{E'd} - S_{Ed}) = T_J T'_d \frac{(x_d - x_q) z_{q\Sigma}}{(x_{d\Sigma}\, x_{q\Sigma} + R^2)\,(x'_{q\Sigma}\, x_{q\Sigma} + R^2)} \times$$

$$\times\,[2E_q \sin\alpha_{11Q} + U \sin(\delta - \alpha_{11Q})]\; U \sin(\delta - \alpha_{11Q}) \qquad (3.7)$$

Scanned with OKEN Scanner

poate să fie mai mic decît zero în domeniul unde $S_{Ed} > S_{E'd}$ (fig. (3.4). În această situaţie ecuaţia caracteristică are o pereche de rădăcini complexe în semiplanul din dreapta

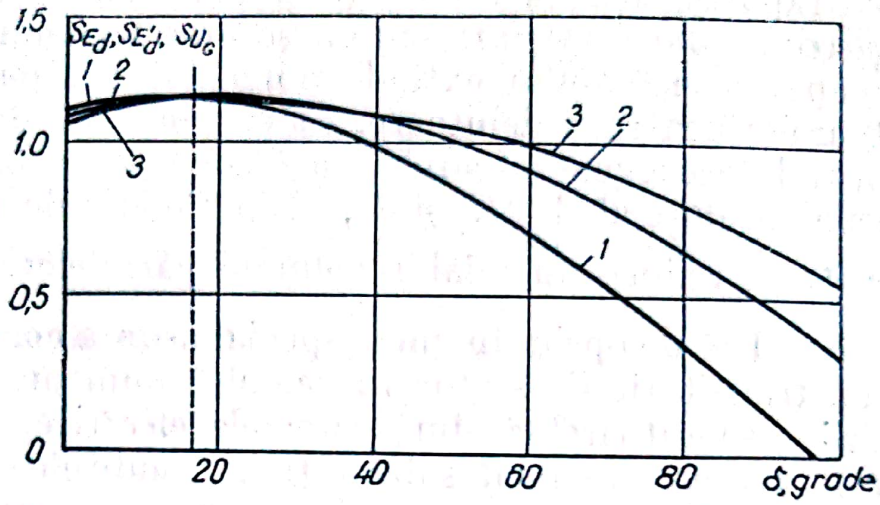


Fig. 3.4. Variaţia mărimilor S_{Ed}, $S_{E'd}$, şi S_{UG} în funcţie de unghiul δ;
1 — S_{Ed}; 2 — $S_{E'd}$; 3 — S_{UG}.

care indică faptul că maşina autopendulează. Din (3.7) rezultă condiţia simplă a apariţiei autopendulării

$$-\arcsin \frac{2E_q \sin \alpha_{11Q}}{U} + \alpha_{11Q} \leqslant \delta \leqslant \alpha_{11Q} = \operatorname{arc\,tg} \frac{R}{x_{q\Sigma}}. \quad (3.8)$$

Domeniul autopendulării în coordonatele E_q şi δ construit din condiţia (3.8) este reprezentat în fig. 3.2, unde se vede că limita superioară a domeniului autopendulării, corespunzătoare regimului de generator, nu depinde de excitarea maşinii, ci este determinată numai de raportul $\frac{R}{x_{q\Sigma}}$. Limita inferioară (regim de motor) este influenţată atît de valoarea rezistenţei, cît şi de valoarea excitaţiei.

Este uşor de observat, din ecuaţia (3.8), că creşterea rezistenţei sistemului sau a gradului de compensare capacitivă longitudinală a reactanţei inductive a liniei de transport duce la extinderea domeniului de autpendulare.

Aici, ca şi în cazul cînd se ţine seama de procesul tranzitoriu, din stator, trebuie să se introducă în schema echivalentă rezistenţa. Calculele făcute, fără a considera procesele tranzitorii din stator dau posibilitatea de a se deter-

mina foarte expeditiv domeniul minim al autopendulării generatoarelor sistemului la $\frac{E_q}{U} = 0$ și să se arate influența vizibilă a rezistenței asupra domeniului de autopendulare a generatoarelor. Totuși în acest caz nu se poate considera excitația mașinii. Cu alte cuvinte, dacă generatorul sincron este excitat, după ce s-a verificat sistemul conform condiției (3.8) se poate obține rezultatul cel mai bun ale zonelor autopendulării. Deosebirea dintre limitele superioare ale zonelor autopendulării generatoarelor, obținute fără a lua în considerare procesele tranzitorii din stator și apoi luîndu-le în considerare, este proporțională aproximativ cu pătratul excitației mașinii adică cu $\left(\frac{E_q}{U}\right)^2$. Ținînd seama de ultima observație apare posibil în calculele orientative să nu se mai țină cont de procesele tranzitorii din stator și să se corecteze rezultatele datorită excitației mașinii prin intermediul unui coeficient oarecare de corecție K. În acest fel limita superioară a domeniului autopendulării generatoarelor se poate obține din condiția

$$\delta = \delta_n \left[1 + K\left(\frac{E_q}{U}\right)^2\right], \tag{3.9}$$

în care

$$\delta_n = \text{arc tg}\,\frac{R}{x_{q\Sigma}}.$$

Coeficientul de corecție K depinde în principal de parametrii

$$T_{d0},\ T_J\,\frac{R}{x_{q\Sigma}} \text{ și } \frac{x_{d\Sigma} - x'_{d\Sigma}}{z_{q\Sigma}}.$$

Din fig. 3.5, se vede dependența coeficientului K de raportul $\frac{R}{x_{p\Sigma}}$ pentru $T_J = 6{,}25$ s; $T_{d0} = 5{,}5$ s; $\frac{E_q}{U} = 1$; $\frac{x_d - x'_d}{z_{q\Sigma}} = 0{,}213$. Această curbă poate fi utilizată la construirea limitei superioare a autopendulării în sistemul cu orice fel de parametri.

Ținînd seama de cele expuse, verificarea unui sistem simplu la posibilitatea apariției autopendulării se recomandă să se facă în felul următor: inițial se deduce schema echi-

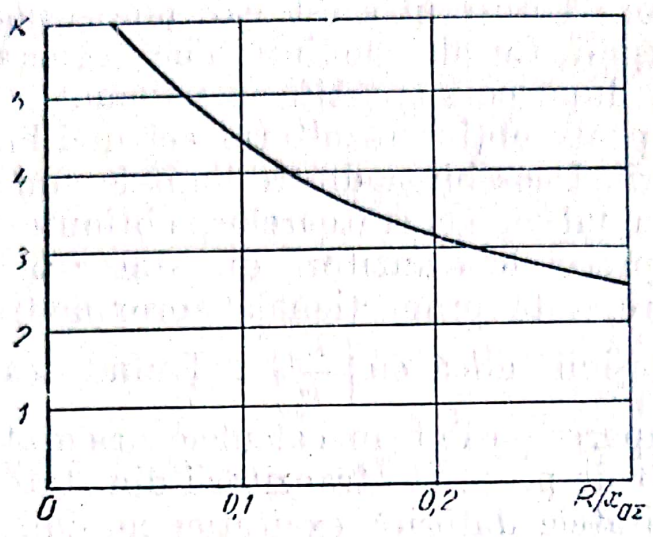


Fig. 3.5. Variația factorului de corecție K în funcție de valoarea relativă a rezistenței;

$$T_J = 6{,}25 \text{ s}; \quad T_{d0} = 5{,}5 \text{ s}; \quad \frac{E_q}{U} = 1.$$

$$\frac{x_d - x'_d}{z^2_{q\Sigma}} = 0{,}213 .$$

valentă, a sistemului, ținînd seama de rezistența tuturor elementelor sale, apoi se găsește ușor raportul $\frac{R}{x_{q\Sigma}}$ care caracterizează domeniul posibil al autopendulării generatorului la $\frac{E_q}{U} = 0$ și se calculează

$$\delta_n = \text{arc tg} \frac{R}{x_{q\Sigma}}.$$

Din relația $K = \left(\frac{R}{x_{q\Sigma}}\right)$ (fig. 3.5) se determină valoarea coeficientului de corecție K. Dacă sistemul considerat are parametri diferiți de $T_J = 6{,}25$ s, $T_{d0} = 5{,}5$ s și $\frac{x_{d\Sigma} - x'_{d\Sigma}}{z_{q\Sigma}} = 0{,}213$, în relația (3.9) se introduce un alt coeficient de

corecția K' deosebit de K, ce se poate afla din relația

$$K' = 0{,}242\, K \frac{T_{d0}}{T_J} \frac{z_{q\Sigma}}{x_d - x'_d},$$

în care T_J, T_{d0}, $\frac{z_{q\Sigma}}{x_d - x'_d}$ sînt parametrii generatoarelor din sistemul în care se caută posibilitatea apariției fenomenului de autopendulare. După determinarea coeficientului K sau K' se construiește frontiera superioară a autopendulării generatoarelor în coordonatele $\frac{E_q}{U}$ și δ, folosind relația (3.9). Frontiera inferioară a domeniului de autopendulare se determină folosind termenul stîng al inegalității (3.8) și anume

$$-\arcsin \frac{2E_q \sin \alpha_{11Q}}{U} + \alpha_{11Q} \leqslant \delta.$$

Domeniile autopendulării generatoarelor obținute în felul acesta caracterizează suficient de bine regimurile sistemului în care este posibilă apariția autopendulării (fig. 3.6); acest lucru reiese din numeroasele calcule și experiențe.

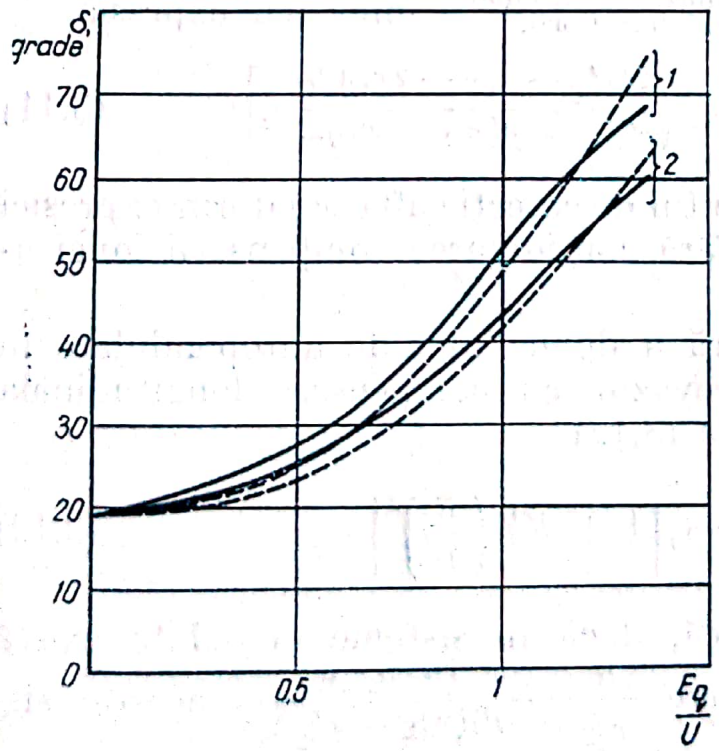


Fig. 3.6. Frontierele domeniului de autopendulare, obținute prin procedeul exact și aproximativ:

1 — $T_{d0} = 10$ s; 2 — $T_{d0} = 7$ s; — frontierele exacte; ——— frontierele aproximative.

Considerarea proceselor tranzitorii în instalația de compensare longitudinală extinde de asemenea domeniul autopendulării sistemului. De exemplu, dacă compensația longitudinală a reactanței inductive a liniei de transport reprezintă circa 40%, în urma considerării proceselor tranzitorii din instalația de compensare longitudinală se lărgește domeniul autopendulării (fig. 3.7). Creșterea domeniului autopendulării poate fi considerată în acest caz, în mod simplificat, prin schimbarea corespunzătoare a coeficientului de corecție K' din ecuația (3.9) care în cazul existenței în sistem a compensării longitudinale capacitive se poate determina cu expresia

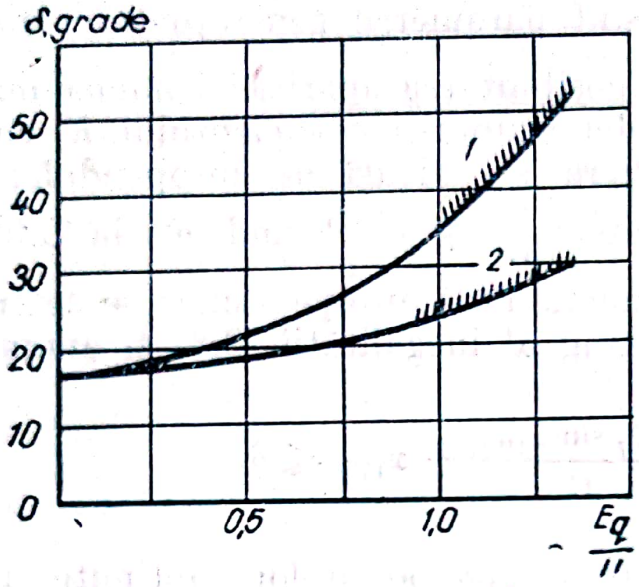


Fig. 3.7. Lărgirea domeniului de autopendulare datorită proceselor tranzitorii în instalația de compensare longitudinală la $T_{d0} = 5{,}5$ s; $T_J = 14{,}4$ s; $x_C = 0{,}48$; $x_{d\Sigma} = 2{,}13$; $x_{q\Sigma} = 1{,}97$; $x'_{d\Sigma} = 1{,}32$:
1 — cu considerarea proceselor tranzitorii în instalația de compensare longitudinală; 2 — neluînd în considerare aceste procese tranzitorii.

$$K'' = K'\left[1 + \frac{2(x'_{d\Sigma} - x_{q\Sigma} - 2x_C)x_C}{(x'_{d\Sigma} - x_C)(x_{q\Sigma} - x_C) - R^2}\right], \qquad (3.11)$$

în care K' este coeficientul de corecție aflat conform expresiei (3.10) și din fig. 3.5 fără considerarea compensării longitudinale capacitive.

Frontiera superioară a domeniului de autopendulare în sistemul care este prevăzut cu compensare longitudinală se determină cu relația (3.12)

$$\delta = \delta_n\left[1 + K''\left(\frac{E_q}{U}\right)^2\right]. \qquad (3.12)$$

Trebuie observat că, dacă în sisteme deosebite există proporționalitate pentru $\frac{R}{x_{q\Sigma}}$ și $\frac{U^2 T_{d0} z_{q\Sigma}}{T_J(x_{d\Sigma} - x'_{d\Sigma})}$, aceste sis-

teme vor avea același domeniu de autopendulare. Ultima condiție dă posibilitatea ca în caz de necesitate să se urmărească influența schimbării parametrilor T_{d0} și T_J ai mașinii asupra domeniului autopendulării. Pentru aceasta nu este

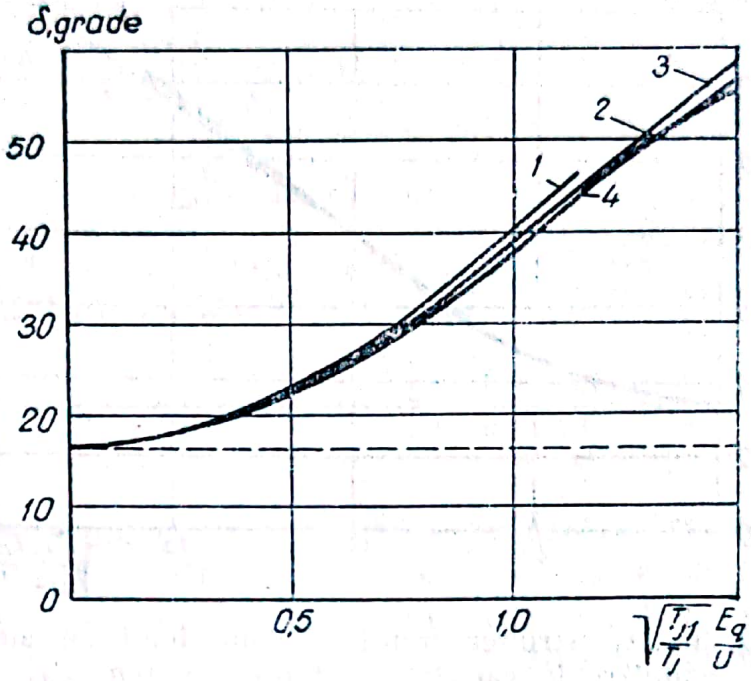


Fig. 3.8. Construirea frontierei domeniului de autopendulare la variația constantei de timp T_J; 1 — $T_J = 20$ s; 2 — $T_J = 14{,}4$ s; 3 — $T_J = 10{,}3$ s; 4 — $T_J = 8$ s.

necesar să se mai construiască în continuare alte domenii ale autopendulării pentru diverși T_{d0} și T_J, ci este suficient să se schimbe scara axei absciselor în mod corespunzător.

Dacă domeniul autopendulării este determinat în coordonatele δ și $\frac{E_q}{U}$ la o constantă dată T_J, T_{J1} va fi practic același domeniu de autopendulare (fig. 3.8), însă în coordonatele δ și $\frac{E_q}{U}\sqrt{\frac{T_{J1}}{T_J}}$. La trecerea de la T_{d0} la T_{d1} trebuie ca scara de pe axa absciselor să fie schimbată cu de $\sqrt{\frac{T_{d0}}{T_{d01}}}$ ori (fig. 3.9).

Dacă verificarea la autopendulare a unui sistem simplu arată posibilitatea apariţiei acestei instabilităţi periodice la sarcini ce pot fi întîlnite în exploatarea sistemului, trebuie

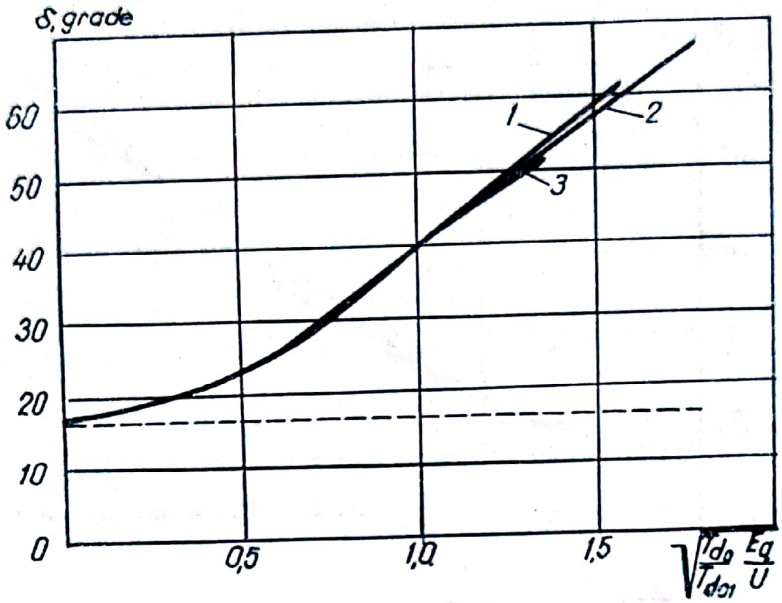


Fig. 3.9. Construirea frontierei domeniului de autopendulare la variaţia constantei de timp T_{d0}:
1 — $T_{d0} = 7$ s; 2 — $T_{d0} = 10$ s; 3 — $T_{d0} = 5{,}5$ s.

să analizăm aceste regimuri mai amănunţit făcînd precizările necesare. În primul rînd trebuie verificată influenţa prin acordarea corespunzătoare a dispozitivului de reglare automată a excitaţiei maşinii şi a dispozitivului de reglare a vitezei.

3.2. *Eliminarea autopendulării prin folosirea înfăşurărilor de amortizare*

Prin alegerea corespunzătoare a parametrilor înfăşurărilor de amortizare, se poate exclude posibilitatea apariţiei autopendulării generatoarelor în sistem practic la orice regimuri.

Analiza comportării maşinii cu înfăşurări de amortizare, ce funcţionează în sistemul simplu (fig. 3.1), se face pe baza ecuaţiilor liniare Park-Gorev — care în cazul cînd în maşină

există înfășurări de amortizare longitudinală și transversală au expresia :

$$\left.\begin{aligned}
&p\Delta\psi_d + \Delta\psi_q + R\Delta i_d + (\psi_{q0}p - U\cos\delta_0)\Delta\delta = 0;\\
&\Delta\psi_d - p\Delta\psi_q - R\Delta i_q + (\psi_{d0}p + U\sin\delta_0)\Delta\delta = 0;\\
&T_J p^2\Delta\delta + i_{q0}\Delta\psi_d + \psi_{d0}\Delta i_q - i_{d0}\Delta\psi_q -\\
&\qquad - \psi_{q0}\Delta i_d = 0;\\
&\Delta\psi_d = x_d(p)\Delta i_d =\\
&= \frac{\sigma_{dD}T_{d0}T_D x''_{d\Sigma}p^2 + (x'_{d\Sigma}T_{d0} + x_{1\Sigma}T_D)p + x_{d\Sigma}}{\sigma_{dD}T_{d0}T_D p^2 + (T_{d0} + T_D)p + 1}\Delta i_d;\\
&\Delta\psi_q = x_q(p)\Delta i_q = \frac{x''_{q\Sigma}T_Q p + x_{q\Sigma}}{T_Q p + 1}\Delta i_q.
\end{aligned}\right\} \quad (3.13)$$

Primele două ecuații exprimă procesele tranzitorii ce au loc în circuitele statorului. Ecuația a treia exprimă procesul tranzitoriu electromecanic de mișcare a rotorului. Ultimele două ecuații reprezintă procesul tranzitoriu electromagnetic ce are loc în circuitele rotorului.

Ecuația caracteristică a sistemului are forma

$$a_0p^7 + a_1p^6 + a_2p^5 + a_3p^4 + a_4p^3 + a_5p^2 + a_6p + a_7 = 0. \quad (3.14)$$

Parametrii regimului ce intră în expresia coeficienților $a_0 - a_7$ [1] pot fi determinați pornind de la regimul stabilizat pentru care se poate scrie :

$$\left.\begin{aligned}
&U_{d0} = -U\sin\delta_0 = -\psi_{q0} - Ri_{d0};\\
&U_{q0} = U\cos\delta_0 = \psi_{d0} - Ri_{q0};\\
&\psi_{d0} = E_{d0} + x_{d\Sigma}i_{d0} = E_{q0} + x_{q\Sigma}i_{d0};\\
&\psi_{q0} = x_{q\Sigma}i_{q0}.
\end{aligned}\right\} \quad (3.15)$$

---

[1]) Expresiile acestor coeficienți se dau în anexa 2.

Scanned with OKEN Scanner

Considerarea proceselor tranzitorii ce au loc în înfășurările de amortizare ale mașinilor sincrone mărește gradul ecuației caracteristice, în comparația cu ecuația (3.2). Analizînd ecuația caracteristică (3.14) a sistemului, din punctul de vedere

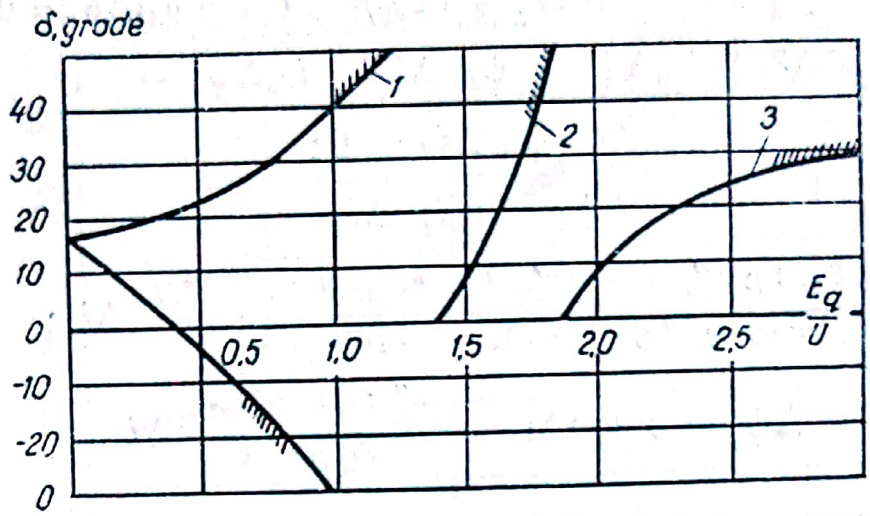


Fig. 3.10. Influența parametrilor înfășurării de amortizare asupra domeniului de autopendulare la $T_{d0} = 5{,}5$ s; 1 — $T_D = 0$; $T_Q = 0$; 2 — $T_D = 0{,}0118$ s, $T_Q = 0{,}00995$ s; 3 — $T_D = 0{,}0236$ s; $T_Q = 0{,}0199$ s.

al stabilității, folosind criteriul Routh, obținem domeniile de instabilitate periodică pentru mașina cu înfășurări de amortizare. Astfel, se observa că înfășurarea de amortizare longitudinală influențează puțin asupra domeniului posibil al autopendulării generatoarelor. Aceasta se explică prin faptul că ea este situată pe aceeași axă cu înfășurarea de excitație a mașinii și realizează, la sarcini reduse, un cuplu de amortizare negativ.

Cercetările analitice referitoare la deducerea domeniului de stabilitate în coordonatele T_j și T_D, pentru regimul de mers în gol (ca cel mai periculos regim din punct de vedere al apariției autopendulării), arată că prin schimbarea parametrilor înfășurării de amortizare longitudinală nu este posibil să se elimine autopendularea.

Prezența, însă a înfășurării de amortizare transversale sau transversale și longitudinale atrage deplasarea domeniilor de autopendulare în sensul excitației mai mari a mașinii și astfel creează condițiile eliminării complete a autopendulării în regimurile normale de exploatare (fig. 3.10).

Acest lucru se poate explica în felul următor : cuplul de amortizare al maşinii sincrone la oscilaţii mici se poate împărţi aproximativ în două componente : una este creată de înfăşurarea de excitaţie şi de circuitul de amortizare longitudinal, iar cealaltă — de înfăşurarea de excitaţie transversală. La funcţionarea în domeniul autopendulării, înfăşurările amplasate pe axa longitudinală dezvoltă un cuplu negativ de amortizare, iar înfăşurarea de amortizare transversală, a cărei axă este perpendiculară pe axa d, creează un cuplu de amortizare pozitiv. Autopendularea va apărea numai atunci cînd cuplul de amortizare negativ al înfăşurării de excitaţie este mai mare decît cel pozitiv creat de înfăşurarea de amortizare transversală. Dacă parametrii înfăşurării de amortizare transversală sînt daţi dinainte, autopendularea va avea loc la excitaţie mărită a maşinii (fig. 3.10) fapt care măreşte componenta cuplului de amortizare datorită înfăşurării de excitaţie. În concluzie, înfăşurarea de amortizare transversală are o importanţă capitală în eliminarea autopendulării maşinii sincrone. Trebuie subliniat că chiar înfăşurări slabe de amortizare pot elimina complet autopendularea. Astfel, valorile minime ale constantelor de timp ale înfăşurărilor de amortizare se situează între limitele cîtorva sutimi de secunde (0,01—0,03), iar cele maxime sînt de ordinul 1,5 s (fig. 3.11).

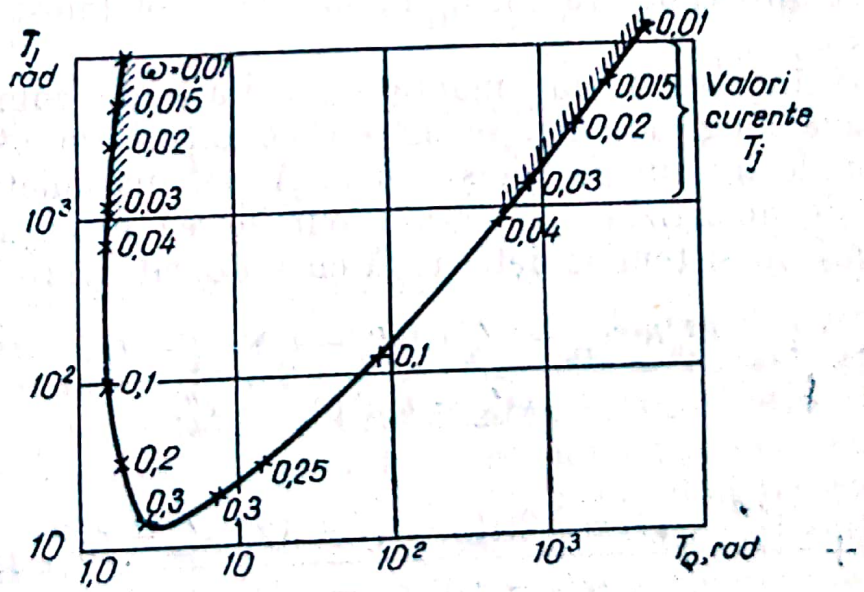


Fig. 3.11. Domeniul autopendulării în coordonatele T_Q şi T_j pentru $\delta_0 = 0$; $\frac{E_{d0}}{U} = \frac{E_{q0}}{U} = 1$.

Limitarea superioară este satisfăcută totdeauna, întrucît chiar pentru turbogeneratoarele cu rotoare masive, constantele de timp ale circuitelor echivalente de amortizare au valorile de ordinul 0,3—0,5 s. Limita inferioară poate fi realizată prin alegerea constantei de timp corespunzătoare a înfășurării de amortizare transversală.

Constanta de timp T_Q la care se elimină complet autopendularea în regimurile normale de exploatare, poate fi determinată aproximativ. Expresia (3.16) se referă la regimul de mers în gol, ca unul din cele mai grele regimuri

$$T_Q \geqslant \frac{T_J}{T_{d0}} \frac{E_{q0}^2 R^2 (x_{d\Sigma} - x'_{d\Sigma})(x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma} + R^2)}{x'^3_{d\Sigma} (x_{q\Sigma} - x''_{q\Sigma})} + \frac{R(x'^2_{d\Sigma} - R^2)}{x'^2_{d\Sigma}(x_{q\Sigma} - x'_{q\Sigma})}. \tag{3.16}$$

Inegalitatea (3.16) s-a obținut în baza analizei ecuației caracteristice a sistemului (3.14) pentru $T_D = 0$. Ultima aproximație este ușor de înțeles, întrucît înfășurarea de amortizare longitudinală, practic, nu influențează condițiile de autopendulare.

Eroarea la determinarea lui T_Q este mică folosindu-se expresia aproximativă (3.16) în loc de a se folosi metoda divizării.

Dacă în sistem sînt montate instalații de compensare capacitivă longitudinală, se măresc condițiile impuse parametrilor de înfășurare transversală. Astfel, parametrii înfășurării de amortizare ce permit eliminarea apariției autopendulării în sistem se determină cu ajutorul expresiei

$$T_Q \geqslant \frac{T_J}{T_{d0}} \frac{E_{q0}^2 R^2 (x_{d\Sigma} - x'_{d\Sigma}) [(x'_{d\Sigma} - x_C)(x_{q\Sigma} - x_C) + R^2]}{(x'_{d\Sigma} - x_C)^3 (x_{q\Sigma} - x''_{q\Sigma})} + \frac{[(x'_{d\Sigma} - x_C)^2 - R^2](x'_{d\Sigma} - x_C) + 4 x_C (x'_{d\Sigma} - x_C)^2}{(x'_{d\Sigma} - x_C)^3 (x_{q\Sigma} - x''_{q\Sigma})} R. \tag{3.17}$$

Comparînd expresia (3.17) cu inegalitatea (3.16) putem observa că datorită considerării proceselor tranzitorii din

instalația de compensare longitudinală, în expresia (3.17) apare o nouă componentă $\frac{4Rx_C(x'_{d\Sigma} - x_C)^2}{(x'_{d\Sigma} - x_C)^3 (x_{q\Sigma} - x''_{q\Sigma})}$ care atrage mărirea valorii minime T_Q în funcție de gradul de compensare capacitivă longitudinală a reactanței inductive a liniei

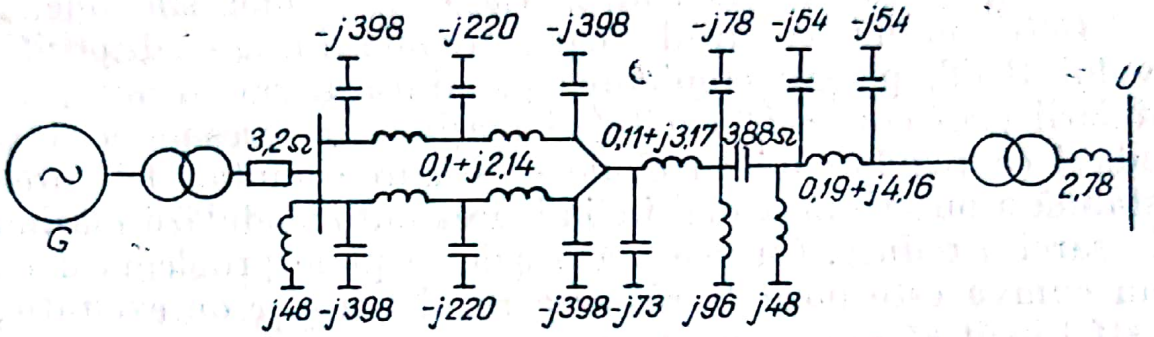


Fig. 3.12. Schema folosită la experiențele privind autopendularea pentru $x_d = 4{,}8\Omega$; $x_q = 3{,}25\Omega$; $x'_d = 1{,}63\Omega$; $T_{d0} = 5{,}5$ s; $T_J = 14{,}4$ s.

de transport; totuși, nici în acest caz nu este nevoie de înfășurare de amortizare puternică pentru îndepărtarea autopendulării.

În laboratorul de cercetări al sistemelor electrice al Institutului de energetică din Moscova au fost efectuate încercări experimentale pentru deducerea influenței înfășurărilor de amortizare asupra condițiilor de apariție a autopendulării. Schema experimentală este reprezentată în fig. 3.12. În cazul analizat rotorul generatorului de modelare era echipat cu înfășurări complete de amortizare. Constantele de timp T_Q și T_D aveau valorile de ordinul 0,2—0,3 s. La mijlocul liniei s-a conectat o instalație de compensație capacitivă longitudinală $x_C = 36\Omega$ care compensa 80% din reactanța inductivă a liniei de transport; la începutul liniei s-a conectat o rezistență de 3,2 Ω, ceea ce corespunde creșterii de aproape șase ori a rezistenței. Se subliniază că, chiar în acest regim foarte greu de lucru, nu s-au observat în sistem autopendulări parametrice. În cazul cînd pe generator nu se prevede înfășurare de amortizare transversală, apar autopendulările. Prin urmare, prin alegerea corespunzătoare a parametrilor înfășurării transversale se poate exclude posibilitatea apariției autopendulării.

3.3. *Determinarea valorilor de reglaj ale regulatorului automat de excitație folosit pentru eliminarea autopendulării*

Autopendularea poate fi îndepărtată nu numai cu ajutorul înfășurărilor de amortizare transversale, ci și prin folosirea reglajului automat al excitației mașinilor sincrone.

Determinînd condițiile care trebuie impuse dispozitivului RAT, pentru eliminarea cu ajutorul său a autopendulării prin comanda excitației mașinii, se presupune totodată că regulatoarele trebuie să asigure simultan debitarea stabilă a puterii maxime și eliminarea autopendulării mașinii la sarcini reduse. Cu această ocazie se pune problema dacă nu cumva este posibilă reglarea regulatoarelor de excitație, astfel încît să se efectueze ambele funcții.

Cercetările analitice asupra posibilității eliminării autopendulării generatoarelor, cu ajutorul RAT în sistemul idealizat, se pot efectua în baza ecuațiilor Park-Gorev liniarizate în punctul regimului inițial. Pentru sistemul simplu (fig. 3.1) ecuațiile au expresia de mai jos pentru generatoarele fără înfășurări de amortizare:

$$\left.\begin{aligned}
&p\Delta\psi_d + \Delta\psi_q + R\Delta i_d + (\psi_{q0}p - U\cos\delta_0)\,\Delta\delta = 0;\\
&\Delta\psi_d - p\Delta\psi_q - R\Delta i_q + (\psi_{d0}p + U\sin\delta_0)\,\Delta\delta = 0;\\
&T_J p^2\Delta\delta + i_{q0}\Delta\psi_d - i_{d0}\Delta\psi_q - \psi_{q0}\Delta i_d + \psi_{d0}\Delta i_q = 0;\\
&\Delta\psi_d = x_d(p)\,\Delta i_d + G(p)\,\Delta U_{fd};\\
&\Delta\psi_q = x_q(p)\,\Delta i_q;\\
&\Delta U_{fd} = W(p)\,\Delta n,
\end{aligned}\right\} \quad (3.18)$$

în care

$$W(p) = \frac{1}{(T_e p + 1)(T_p p + 1)}\left(K_{0n} + \frac{K_{1np}}{T_{p1}p + 1} + \frac{K_{2np^2}}{T_{p2}p + 1}\right).$$

Simbolul n se referă la parametrii (δ, i, U_G) după care se realizează reglajul excitației. $W(p)$ reprezintă funcția de transfer a sistemului ce este reglat în care sînt considerate procesele tranzitorii ce au loc în regulator și excitatoare.

Constantele de timp T_{p1} și T_{p2} țin seama de întîrzierea din dispozitivele de diferențiere. K_{0n}, K_{1n} și K_{2n} sînt factorii de amplificare în funcție de abaterea parametrului reglat și ale derivatelor sale.

Din ecuațiile (3.18) se vede că variația fluxului total de-a lungul axei longitudinale, depinde de reacția statorului Δi_d și de tensiunea ΔU_{fd} a înfășurării de excitație care este schimbată de regulatorul de excitație.

Parametrul reglat Δn se poate exprima prin Δi_d, Δi_q și $\Delta\delta$ sub forma

$$\Delta n = M(p)\,\Delta i_d + N(p)\,\Delta i_q + L(p)\,\Delta\delta. \tag{3.19}$$

Expresiile $M(p)$, $N(p)$ și $L(p)$ au forma :

— pentru regulatorul după tensiune

$$\left.\begin{aligned}
M(p) &= -\left[(R + x_{ex}p)\frac{U_{Gd0}}{U_{G0}} - x_{ex}\frac{U_{Gq0}}{U_{G0}}\right];\\
N(p) &= -\left[x_{ex}\frac{U_{Gd0}}{U_{G0}} + (R + x_{ex}p)\frac{U_{Gq0}}{U_{G0}}\right];\\
L(p) &= -\left[(x_{ex}i_{q0}p - U\cos\delta_0)\frac{U_{Gd0}}{U_{G0}} - \right.\\
&\quad \left. - (x_{ex}i_{d0}p + U\sin\delta_0)\frac{U_{Gq0}}{U_{G0}}\right];
\end{aligned}\right\} \tag{3.20}$$

— pentru regulatorul după curent :

$$\left.\begin{aligned}
M(p) &= \frac{i_{d0}}{i_0};\\
N(p) &= \frac{i_{q0}}{i_0};\\
L(p) &= 0;
\end{aligned}\right\} \tag{3.21}$$

— pentru regulatorul după unghi :

$$\begin{aligned}
M(p) &= 0;\\
N(p) &= 0;\\
L(p) &= 1.
\end{aligned} \tag{3.22}$$

Scanned with OKEN Scanner

Rezolvînd sistemul de ecuații (3.18) și ținînd seama de relațiile (3.19) obținem ecuația caracteristică :

$$
\begin{aligned}
D(p) = {} & T_J p^2 \{[p x_d(p) + R][p x_q(p) + R] + x_d(p)\, x_q(p)\} + \\
& + [p x_d(p) + R][\psi_{d0} - i_{d0}\, x_q(p)][\psi_{d0} p + U \sin \delta_0] - \\
& - [p x_d(p) + R][i_q x_d(p) - \psi_{q0}][\psi_{q0} p - U \cos \delta_0] - \\
& - x_d(p)[\psi_{d0} - i_{d0} x_q(p)][\psi_{q0}\, p - U \cos \delta_0] - x_q(p) \times \\
& \times [i_{q0}\, x_d(p) - \psi_{q0}][\psi_{d0}\, p + U \sin \delta_0] + \qquad (3.23) \\
& + G(p)\, W(p)\, M(p) \{T_J p^2[(p^2 + 1)\, x_q(p) + pR] - [p x_q(p) + \\
& + R] i_{q0} [\psi_{q0} p - U \cos \delta_0] - x_q(p) i_{q0} [\psi_{d0} p + U \sin \delta_0] + \\
& + p[\psi_{d0} - i_{d0}\, x_q(p)][\psi_{d0}\, p + U \sin \delta_0] - [\psi_{d0} - i_{d0}\, x_q(p)] \times \\
& \times [\psi_{q0}\, p - U \cos \delta_0]\} - G(p)\, W(p)\, N(p) \{T_J p^2 R - \\
& - [\psi_{q0}\, p + i_{q0}\, R][\psi_{d0}\, p + U \sin \delta_0] + \psi_{q0} [\psi_{q0} p - \\
& - U \cos \delta_0]\} + G(p)\, W(p)\, L(p) \{R [p x_q(p) + R]\, i_{q0} + \\
& + R[\psi_{d0} - i_{d0}\, x_q(p)] + \psi_{q0} [(p^2 + 1)\, x_q(p) + Rp]\} = 0.
\end{aligned}
$$

Problema cercetării ecuației (3.23) constă în acordarea optimă a regulatorului pentru care se garantează funcționarea stabilă a sistemului în toate regimurile posibile. O asemenea analiză reprezintă în general o problemă extrem de dificilă.

Dacă se neglijează întîrzierea și dispozitivele de diferențiere, fapt care arată analiza — nu duce la erori mari, ecuația caracteristică (3.23) se simplifică căpătînd următoarea expresie :

— la reglajul după curent :

$$
\begin{aligned}
D(p) = {} & (T_c p + 1)(T_p p + 1)(a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + \\
& + a_4 p + a_5) + (b_0 p^4 + b_1 p^3 + b_2 p^2 + b_3 p + b_4)(K_{0i} + \qquad (3.24) \\
& + K_{1i}\, p + K_{2i} p^2) = 0,
\end{aligned}
$$

unde : $a_0 - a_5$ au fost dați anterior;

$b_0 - b_4$ se determină cu expresiile :

$$b_0 = T_j x_{q\Sigma} \frac{i_{d0}}{i_0};$$

$$b_1 = T_J R \frac{i_{d0}}{i_0};$$

$$b_2 = \{T_J x_{q\Sigma} + [(\psi_{d0} - i_{d0} x_{q\Sigma})\psi_{q0} - \psi_{q0}^2]\} \frac{i_{d0}}{i_0} - (T_J R - \psi_{d0}\psi_{q0}) \frac{i_{q0}}{i_0}$$

$$b_3 = -[(\psi_{d0} - i_{d0} x_{q\Sigma})\psi_{q0} + (\psi_{d0} + i_{q0} R)\psi_{q0} - (\psi_{d0} - i_{d0} x_{q\Sigma}) U \sin \delta_0 - \psi_{q0} U \cos \delta_0] \frac{i_{d0}}{i_0} + (R i_{q0} \psi_{d0} + \psi_{q0} U \sin \delta_0 - \psi_{q0}^2) \frac{i_{q0}}{i_0};$$

$$b_4 = -[\psi_{q0} U \sin \delta_0 - (\psi_{d0} - i_{d0} x_{q\Sigma} + i_{q0} R) U \cos \delta_0] \frac{i_{q0}}{i_0} + i_{q0} [x_{q\Sigma} U \cos \delta_0 + R U \sin \delta_0)] \frac{i_{q0}}{i_0};$$

— la reglajul după unghi :

$$D(p) = (T_e p + 1)(T_p p + 1)(a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5) + (b_0 p^2 + b_1 p + b_2) \times (K_{0\delta} + K_{1\delta} p + K_{2\delta} p^2) = 0, \qquad (3.25)$$

unde :

$$b_0 = x_{q\Sigma} \psi_{q0};$$

$$b_1 = 2R \psi_{q0};$$

$$b_2 = R(\psi_{d0} - i_{d0} x_{q\Sigma}) + (\psi_{q0} x_{q\Sigma} + i_{q0} R^2).$$

— la reglajul după tensiunea la bornele generatorului

$$D(p) = (T_e p + 1)(T_p p + 1)(a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5) + \Big\{(b_0 p^4 + b_1 p^3 + b_2 p^2 + b_3 p + b_4)\left[(R + x_{ex} p)\frac{U_{Gd0}}{U_{G0}} - x_{ex}\frac{U_{Gq0}}{U_{G0}}\right] + (C_0 p^2 + C_1 p + C_2) \times$$

$$\times \left[x_{ex} \frac{U_{Gd0}}{U_{G0}} + (R + x_{ex} p) \frac{U_{Gq0}}{U_{G0}} \right] +$$

$$+ (d_0 p^2 + d_1 p + d_2) \left[(x_{ex} i_{q0} p - U \cos \delta_0) \frac{U_{Gd0}}{U_{G0}} - \right.$$

$$\left. \left. - (x_{ex} i_{d0} p + U \sin \delta_0) \frac{U_{Gd0}}{U_{G0}} \right] \right\} \times$$

$$\times (K_{0UG} + K_{1UG} p + K_{2UG} p^2) = 0, \qquad (3.26)$$

unde $a_0 - a_5$ au fost dați anterior;

$b_0 - b_4$, $C_0 - C_2$ și $d_0 - d_2$ se determină cu următoarele relații:

$$b_0 = - T_J x_{q\Sigma};$$

$$b_1 = - T_J R;$$

$$b_2 = - T_J x_{q\Sigma} - [(\psi_{d0} - i_{d0} x_{q\Sigma}) \psi_{d0} - \psi_{q0}^2];$$

$$b_3 = (\psi_{d0} - i_{d0} x_{q\Sigma}) \psi_{q0} + (\psi_{d0} + i_{q0} R) \psi_{q0} - (\psi_{d0} -$$

$$- x_{q\Sigma} i_{d0}) U \sin \delta_0 - \psi_{q0} U \cos \delta_0;$$

$$b_4 = \psi_{q0} U \sin \delta_0 - (\psi_{d0} - i_{d0} x_{q\Sigma} + i_{q0} R) U \cos \delta_0;$$

$$C_0 = T_J R - \psi_{d0} \psi_{q0};$$

$$C_1 = - (- \psi_{q0}^2 + R i_{d0} \psi_{d0} + \psi_{q0} U \sin \delta_0);$$

$$C_2 = - i_{q0} (x_{q\Sigma} U \cos \delta_0 + R U \sin \delta_0);$$

$$d_0 = - x_{q\Sigma} \psi_{q0}; \qquad d_1 = - 2R \psi_{q0};$$

$$d_2 = - [i_{q0} R^2 - \psi_{d0} x_{q\Sigma} + R (- i_{d0} x_{q\Sigma} + \psi_{d0})].$$

Parametrii ψ_{q0}, ψ_{d0}, i_{d0}, i_{q0} ai regimului sistemului se pot obține din ecuațiile regimului stabilizat:

$$\left.\begin{aligned} U_{d0} &= - U \sin \delta_0 = - \psi_{q0} - R i_{d0}; \\ U_{q0} &= U \cos \delta_0 = \psi_{d0} - R i_{q0}; \\ \psi_{d0} &= E_{d0} + x_{d\Sigma} i_{d0}; \\ \psi_{q0} &= x_{q\Sigma} i_{q0}. \end{aligned}\right\} \qquad (3.27)$$

Adoptînd din unele considerente felul de reglare al excitației să studiem una din ecuațiile sistemului (3.24) — (3.26), din punct de vedere al stabilității, prin oricare din metodele cunoscute. Cea mai indicată ar părea folosirea criteriului Routh sau a metodei diviziunii.

În urma analizei se determină valoarea de reglaj a regulatorului și factorii de amplificare pentru parametrul de reglaj adoptat, prin stabilirea cărora se exclude în sistem apariția autopendulării generatoarelor.

Trebuie avut în vedere că, dacă în ecuațiile (3.24)—(3.26) K_{1n} și K_{2n} se consideră egali cu zero, obținem cazul în care pe mașina sincronă este montat regulatorul de tipul proporțional.

Prezentarea rezultatelor cercetărilor analitice și experimentale ale diverselor tipuri de RAT au scopul deducerii posibilității de eliminare a instabilității periodice a generatoarelor la sarcini reduse.

În urma analizei ecuației (3.24) [1] se poate spune că, în cazul în care pe generatoarele sistemului sînt montate dispozitive de compundare, pentru a elimina autopendularea mașinii, va trebui să se acorde regulatorul la factor de amplificare negativ (fig. 3.13). Aceasta înseamnă că la creșterea curentului statorului, regulatorul va acționa în sensul micșorării excitației. Astfel, tensiunea la barele stației debitoare scade nu numai datorită scăderii de tensiune în rezistențele schemei, ci și datorită micșorării excitației fapt care, natural, influențează defavorabil funcționarea sarcinii alimentate de la barele centralei și menținerea stabilității sistemului la unghiurile δ mari. Dacă însă tensiunea la bornele generatoarelor este menținută de regulatorul de tensiune, autopendularea nu se poate elimina chiar la schimbarea între limite mari a valorilor de reglaj al unui asemenea regulator.

La analiza posibilităților de îndepărtare a autopendulării cu ajutorul regulatorului electrono-ionic se analizează ecuația (3.26) considerînd că $K_{1UG} = K_{2UG} = 0$. Domeniile de stabilitate în coordonatele δ și K_{0UG} sînt date pentru acest caz în fig. 3.14. Dreapta punctată împarte axa abscselor în două părți. Partea din stînga corespunde zonei de autopendulare în cazul în care lipsește regulatorul de ten-

---

[1]) Cînd K_{1i} și K_{2i} sînt egali cu zero.

Scanned with OKEN Scanner

siune. Din fig. 3.14 se poate vedea că pentru eliminarea autopendulării trebuie o anumită acordare a RAT. Factorii de amplificare ai regulatorului pentru sarcini mici ($\delta < 40°$) trebuie să fie mai mari [$K_{0UG} = 2-3$]. Dacă generatorul

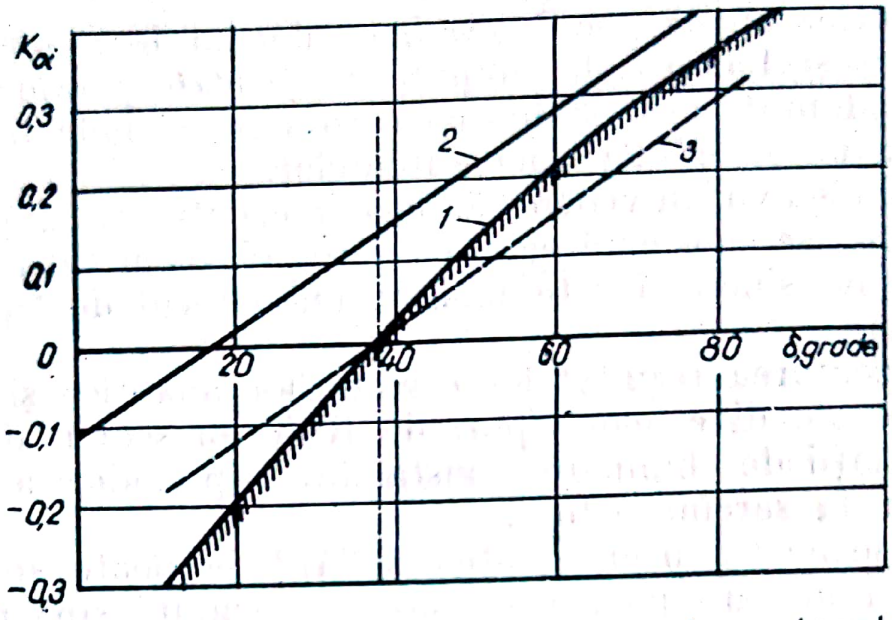


Fig. 3.13. Acordarea dispozitivului de reglare automată a excitației în funcție de curent pentru eliminarea autopendulării la $T_e = 0$:

1 — luînd în considerare procesele tranzitorii din circuitul statorului; 2 — fără considerarea proceselor tranzitorii din stator; *3* — prin deplasarea curbei *2*.

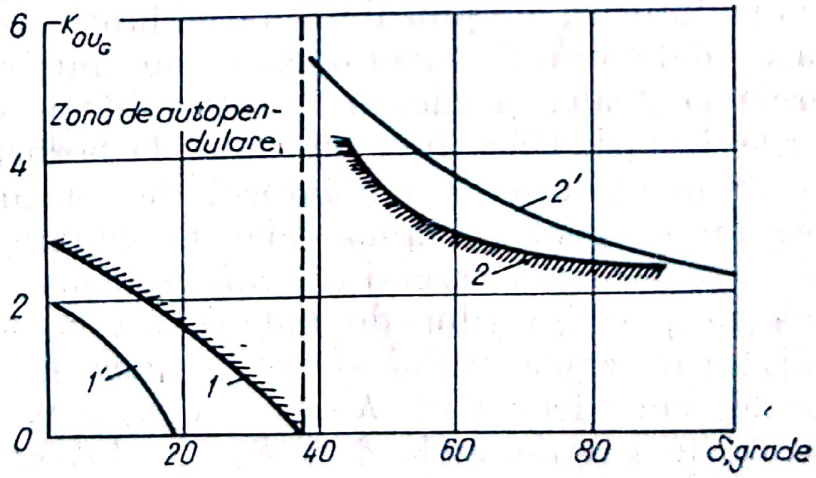


Fig. 3.14. Acordarea dispozitivului de reglare automată a excitației în funcție de tensiune pentru eliminarea autopendulării la $T_e = 0$:

1,2 — se iau în considerare procesele tranzitorii din circuitele statorului; *1'*, *2'* — neluarea în considerare a acestor procese tranzitorii.

sincron funcționează la sarcini mari ($\delta > 60°$), pentru eliminarea suprareglării nu se admite acordarea regulatorului la factori de amplificare mai mari de 2,5 — 3. Acordarea regulatorului trebuie să satisfacă ambele condiții menționate. De exemplu, dacă regulatorul de tensiune are factorul de amplificare $K_{0UG} = 2{,}4$, sistemul reprezentat în fig. 3.1 poate funcționa stabil pentru unghiurile $\delta_l = 10 - 90°$. Trebuie subliniat că acordarea regulatorului depinde puțin de factorul de putere al centralei debitoare. Acest ultim fapt ușurează acordarea sa.

Analizînd posibilitatea eliminării autopendulării cu ajutorul RAT cu acțiune intensă se observă că autopendularea apare în sistem datorită cuplului de amortizare negativ dezvoltat de mașina sincronă la sarcini mici. Pentru compensarea acestui cuplu este necesar un alt cuplu de amortizare pozitiv. Un astfel de cuplu poate fi creat de regulatorul care să fie sensibil la derivata parametrului de reglat.

Cercetările privind posibilitatea de eliminare a autopendulării cu RAT cu acțiune intensă se reduc în acest caz la căutarea domeniilor de stabilitate după factorii K_{1n} și K_{2n}. Întrucît toți coeficienții ecuațiilor (2.34) — (3.26) sînt esențial pozitivi la sarcini reduse, analiza lor din punct de vedere al stabilității se face cu ajutorul metodei divizărilor.

Rezultatele analizei arată că RAT cu acțiune intensă în funcție de curent și unghi (frecvență) evită autopendularea. În acest scop trebuie introdusă în legea de reglaj derivatele abaterilor de curent sau unghi. Totuși, domeniul stabilității cuprinde o arie suficient de mare în planul factorilor de amplificare pozitivi în funcție de derivate și de aceea acordarea regulatorului cu acțiune intensă în scopul eliminării autopendulării se face fără dificultăți deosebite. De obicei, la transportul prin linie a puterii maxime, condițiile impuse acordării regulatorului sînt mai rigide. Totuși este posibilă o acordare generală a regulatorului, atît pentru asigurarea stabilității periodice a generatorului la sarcini mici, cît și a stabilității periodice la transportul pe linie a puterii maxime (fig. 3.15). Rezultatele calculelor și cercetărilor analitice au fost verificate experimental în laboratorul de sisteme electrice al Institutului de energetică din Moscova.

Scanned with OKEN Scanner

Schema pentru cercetările experimentale pe modelul dinamic a reprezentat linia de transport de la centrala hidroelectrică de pe Volga pînă la Moscova. Generatorul sincron al modelului nu a avut înfăşurări de amortizare; la mijlocul liniei s-a intercalat o instalaţie de compensare longitudinală, care compensa 42% din reactanţa inductivă a liniei de transport. La începutul liniei (după transformatorul ridicător) s-a inclus o rezistenţă suplimentară care a mărit de cinci ori rezistenţa liniei de transport. La efectuarea experienţelor, generatorul a fost prevăzut cu regulator de excitaţie corespunzător, cu ajutorul căruia s-a analizat posibilitatea îndepărtării autopendulării generatorului.

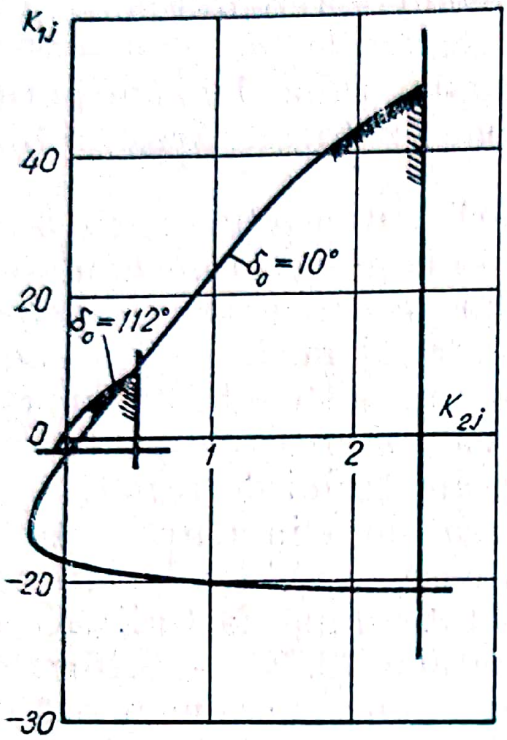


Fig. 3.15. Acordarea dispozitivelor de reglare automată a excitaţiei ce permite evitarea autopendulării şi transportul unei puteri maxime prin linie la $\frac{E_d}{U} = 1$; $K_{0i} = 0{,}455$, $T_e = 0$

În fig. 3.16 este reprezentată oscilograma care indică procesul de eliminare a autopendulării cu ajutorul unui RAT cu acţiune intensă în funcţie de frecvenţă (unghi).

Pînă la conectarea RAT cu acţiune intensă se observă autopendularea generatorului cu oscilaţii de unghi δ a căror amplitudine atinge 47°, iar raportul dintre unghiul maxim şi cel minim se apropie de 2. După cum rezultă şi din oscilograme, după conectarea RAT, oscilaţiile se amortizează rapid şi după aproximativ 1 s sistemul şi-a revenit la regimul iniţial, continuînd mai departe să funcţioneze stabil.

Analizînd influenţa considerării proceselor tranzitorii din stator asupra domeniului de stabilitate a sistemului şi asupra acordării regulatorului pentru îndepărtarea autopendulării observăm că ecuaţiile (3.24) — (3.26) ţin seama de procesele tranzitorii din stator şi de aceea domeniile de stabilitate,

determinate cu ajutorul acestor ecuații dau tabloul complet al acordării regulatorului în zona analizată.

Neconsiderarea proceselor tranzitorii din stator dă posibilitatea să se simplifice ecuațiile (3.24) — (3.26), ceea ce

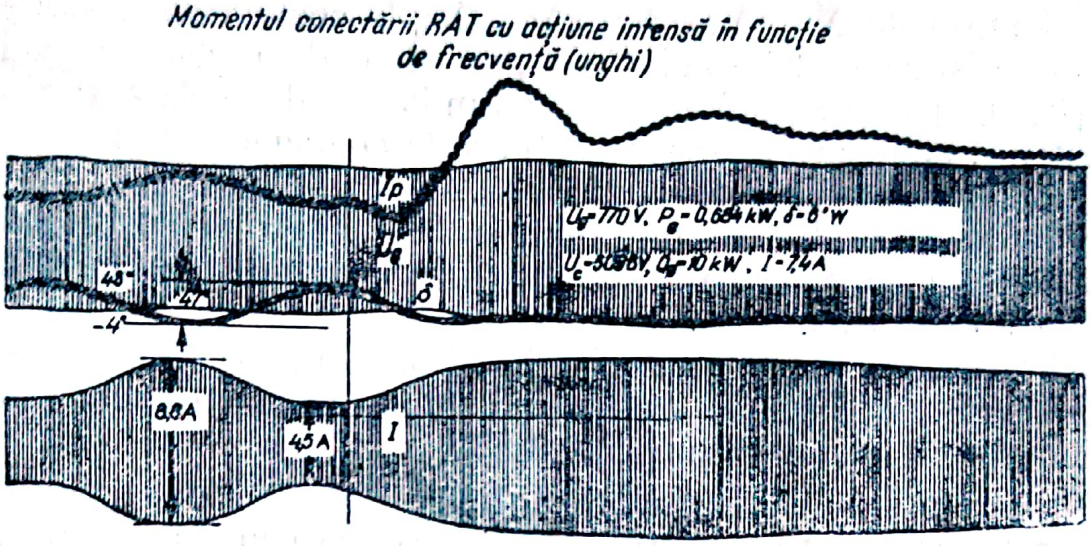


Fig. 3.16. Oscilograma care ilustrează procesul de eliminare a autopendulării cu ajutorul dispozitivului de reglare automată a excitației cu acțiunea intensă.

natural reduce volumul calculelor respective, dar în acest caz se pot obține și rezultate incorecte.

Dacă se neglijează procesele tranzitorii din stator și întîrzierea din dispozitivele de diferențiere, ecuația caracteristică a sistemului (fig. 3.1) are forma

$$a_0 p^5 + (a_1 + \Delta a_1)\, p^4 + (a_2 + \Delta a_2)\, p^3 + (a^3 + \Delta a_3)\, p^2 + \\ + (a_4 + \Delta a_4)\, p + a_5 + \Delta a_5 = 0, \qquad (3.28)$$

în care :

$$a_0 = T_J T'_d T_e T_p;$$

$$a_1 = T_J (T'_d\, T_e + T'_d T_p + T_e T_p);$$

$$a_2 = S_{E'd} T'_d T_e T_p + T_J (T'_d + T_e + T_p);$$

$$a_3 = S_{Ed} T_e T_p + S_{E'd} T'_d (T_e + T_p) + T_J;$$

$$a_4 = S_{Ed}\, (T_e + T_p) + S_{E'd} T'_d;$$

$$a_5 = S_{Ed},$$

unde :

$$T'_d = T_{d0} \frac{x'_{d\Sigma}\, x_{q\Sigma} + R^2}{x_{d\Sigma}\, x_{q\Sigma} + R^2}.$$

Adaosurile Δa_1, Δa_2, Δa_3, Δa_4, Δa_5 la coeficienții ecuației caracteristice (3.28) depind de procedeul de reglare a excitației. După ce s-a adoptat un anumit gen de reglare și respectiv și adaosurile corespunzătoare la coeficienții ecuațiilor, se pot obține ecuații analoge cu (3.24), (3.25) și (3.26).

În tabelul 3.2 se dau expresiile pentru adaosurile la coeficienții ecuației caracteristice (3.28) în funcție de felul reglării excitației.

Folosind ecuația (3.28) și tabelul 3.2 au fost determinate domeniile stabilității sistemului cînd generatoarele sînt echipate cu diverse tipuri de RAT.

Compararea rezultatelor obținute prin metoda precisă și cea aproximativă arată că dacă generatorul are dispozitiv de compundare, domeniul funcționării stabile a sistemului este limitat de curba *2* (fig. 3.13) dacă nu se ține seama de procesele tranzitorii din stator. Domeniul stabilității sistemului, limitat de curba *1* este găsit cu ecuația (3.24) ținînd seama de procesele tranzitorii din stator. Comparînd domeniile de stabilitate, delimitate de curbele *2* și *1* se observă că neluînd în considerare procesele tranzitorii din stator se introduce o eroare mare în determinarea valorilor de reglaj al regulatorului. Totuși dacă curba *2* se deplasează spre dreapta, paralel cu ea însăși, mărind astfel domeniul de autopendulare provocată de procesele tranzitorii din stator (curba *3*), se obține domeniul de stabilitate care corespunde aproximativ domeniului construit cu ajutorul ecuațiilor exacte. De exemplu, în cazul cînd nu se iau în considerare procesele tranzitorii din stator, domeniul de autopendulare (3.13) va corespunde unghiului $\delta = 16{,}5°$, iar în cazul considerării proceselor tranzitorii în stator, acest domeniu se extinde pînă la un unghi $\delta = 38°$. După ce s-au efectuat construcțiile reprezentate în fig. 3.13, se găsește cu aproximație domeniul de stabilitate apropiat de domeniul construit ținînd seama de toate ecuațiile. Unghiul care limitează domeniul de autopendulare la raportul $\frac{E_q}{U}$ dat și considerînd

Tabelul 3.2[1])

Procedeul de reglare	Δa_1	Δa_2	Δa_3	Δa_4	Δa_5
$k_{0\delta}\Delta\delta$	—	—	—	—	$k_{0\delta} P'_{Ed}$
$k_{1\delta}\Delta\delta$	—	—	—	$k_{1\delta} P'_{Ed}$	—
$k_{2\delta}\Delta\delta$	—	—	$k_{2\delta} P'_{Ed}$	—	—
$k_{0U}\Delta U$	—	—	$k_{0U} \frac{P'_{Ed}}{P'_{UG}} T_J$	—	$k_{0U} \frac{P'_{Ed}}{P'_{UG}} S_{UG}$
$k_{1U}\Delta U$	—	$k_{1U} \frac{P'_{Ed}}{P'_{UG}} T_J$	—	$k_{1U} \frac{P'_{Ed}}{P'_{UG}} S_{UG}$	—
$k_{2U}\Delta U$	$k_{2U} \frac{P'_{Ed}}{P'_{UG}} T_J$	—	$k_{2U} \frac{P'_{Ed}}{P'_{UG}} S_{UG}$	—	—
$k_{0i}\Delta I$	—	—	$k_{0i}(-T_J I_{E'd})$	—	$K_{0i}(P'_{Ed} I'_\delta - I'_{Ed} S_{Ed}$
$k_{1i}\Delta I$	—	$k_{1i}(-T_J I_{E'd})$	—	$k_{1i}(P'_{Ed} I'_\delta - I'_{Ed} S_{Ed})$	—
$k_{2i}\Delta I$	$k_{2i}(-T_J I_{E'd})$	—	$k_{2i}(P'_{Ed} I'_\delta - I'_{Ed} S_{Ed})$	—	—

[1]) În anexa 3 sînt date expresiile pentru $\Delta a_1 - \Delta a_5$.

Scanned with OKEN Scanner

procesele tranzitorii din stator trebuie aflat cu ajutorul expresiei (3.9).

În cazul în care generatorul este echipat cu regulator electro-ionic de tensiune, obținem aceeași situație. În fig. 3.14 sînt reprezentate, prin curbele *1'* și *2'*, domeniile de stabilitate în cazul în care se neglijează procesele tranzitorii din stator; curbele *1* și *2* au fost construite ținînd seama de ecuația completă (3.26). Diferența între domeniile de stabilitate, obținute prin ambele metode, are valoarea mică. Cerințele impuse la acordarea regulatorului, în cazul în care se ține seama de procesele tranzitorii din stator, sînt mai rigide, deoarece domeniile de stabilitate limitate de curbele *1'* și *2'* sînt mai puțin întinse decît domeniile limitate de curbele *1* și *2*.

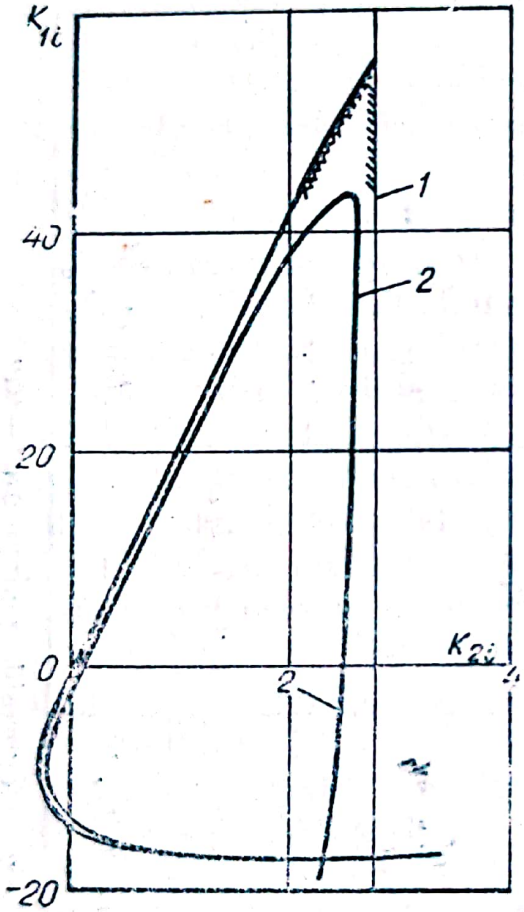


Fig. 3.17. Influența proceselor tranzitorii din circuitele statorului asupra frontierei domeniului de funcționare stabilă a unei mașini reglabile, pentru $\frac{E_q}{U}=1$, $\delta=16{,}5°$; $T_e=0$; $K_{0i}=0$

1 — fără considerarea proceselor tranzitorii din circuitele statorului; *2* — luîndu-se în considerare.

Diferența între domeniile de stabilitate poate duce la erori neglijabile dacă se deplasează paralel cu el însuși limita domeniului de stabilitate aflată, fără a ține seama de procesele tranzitorii din stator; această deplasare se face astfel încît, limita să treacă prin axa absciselor pentru unghiul aflat cu relația (3.9) cunoscînd raportul $\frac{E_q}{U}$.

Considerarea proceselor tranzitorii din stator, în cazul în care generatoarele sînt echipate cu RAT cu acțiune intensă (funcție de curent, unghi sau frecvență), îngustează întrucîtva domeniul funcționării stabile în comparație cu domeniul determinat fără a ține seama de procesele tranzitorii din stator. Cu alte cuvinte, pentru considerarea proceselor

tranzitorii în stator este nevoie de operații de acordare mai minuțioase la regulator (fig. 3.17). Diferența între domeniile de stabilitate obținute prin ambele metode nu este mare.

Ținînd seama de cele expuse, la alegerea aproximativă a valorilor de acord ale regulatorului cu acțiune intensă în scopul obținerii funcționării stabile a sistemului în domeniile de autopendulare, se poate renunța la considerarea proceselor tranzitorii din stator, fenomen care ușurează esențial lucrările de calcul necesare pentru construirea domeniilor de stabilitate. Alegerea valorilor de acord RAT cu acțiune intensă trebuie însă făcută pentru regimurile de funcționare limitate de unghiurile $\delta \leqslant \text{arc tg} \frac{R}{x_{q\Sigma}}$.

Pentru a analiza alte procedee de reglare, după construirea domeniilor de stabilitate fără considerarea procesului tranzitoriu din stator $\left(\delta \leqslant \text{arc tg} \frac{R}{x_{q\Sigma}}\right)$, trebuie deplasată limita domeniului stabil în conformitate cu relația (3.9).

Acordul regulatoarelor trebuie verificat experimental. Combinarea teoriei și experienței în timpul cercetărilor permite să se detecteze eventualele aproximări din timpul rezolvării problemei respective, făcute pe de o parte în scopul de a simplifica vizibil analiza și a reduce volumul calculelor, iar pe de altă parte să se verifice dacă aceste aproximări nu introduc erori mari în rezultatele cercetărilor. O asemenea simplificare în cazul dat ar constitui o renunțare la procesele tranzitorii din stator.

Scanned with OKEN Scanner

CAPITOLUL 4

Autoexcitarea în sistemul complex

4.1. *Construirea domeniilor de autoexcitare a generatoarelor care funcționează în sisteme complexe*

La proiectarea și exploatarea sistemelor electrice complexe, cum și la construirea unor noi linii de transport de energie, se impune necesitatea verificării lor la lipsa de autoexcitare a mașinilor sincrone. Probleme asemănătoare apar și în exploatarea întreprinderilor industriale unde există motoare mari asincrone cu compensare longitudinală sau transversală.

Domeniul autoexcitării în sistemele complexe este mai mare decît în sistemul „centrală-bare". Aceasta se explică prin aceea că puterile de reacție și asincrone, datorită cărora este posibilă apariția autoexcitării, sînt create în asemenea sisteme de toate mașinile sincrone ce intră în componența lor. Prin urmare, la determinarea condițiilor de autoexcitare a mașinilor electrice din sistemele complexe este necesar să fie luate în considerare toate centralele care funcționează în sistem.

Metoda exactă de verificare a sistemului la autoexcitare constă în aceea că pentru fiecare element al său se scriu ecuațiile operaționale complete ce caracterizează procesul tranzitoriu. Cercetarea ecuației caracteristice obținute în acest caz dă posibilitatea de a construi domeniile de autoexcitare a generatoarelor. Și în acest caz ca și la sistemul

Scanned with OKEN Scanner

simplu, sînt posibile zonele autoexcitării sincrone și asincrone.

Analiza ecuației caracteristice a sistemului complex, în scopul construirii zonelor autoexcitării, este însoțită de o serie întreagă de dificultăți.

Gradul ecuației caracteristice a sistemului complex cu parametrii concentrați se determină aproximativ cu relația

$$n = m + 2\,l, \tag{4.1}$$

în care: m este numărul înfășurărilor de pe rotoarele mașinilor, nelegate între ele; coliviile de amortizare de pe rotoare se reprezintă prin două circuite echivalente de-a lungul axelor d, q;

l — numărul gradelor de libertate ale circuitelor statorice.

Din ecuația (4.1) se poate vedea că complicarea sistemului electric și mărirea numărului lui de mașini duc la creșterea radicală a gradului ecuației caracteristice. De exemplu, pentru schema cu trei mașini sincrone (fig. 4.8, *b*), prevăzute cu circuite de amortizare longitudinale și transversale, $m = 9$, iar $l = 4$. Deci, ecuația caracteristică a unui sistem cu trei mașini va avea gradul 17. Deducerea ecuației caracteristice de un grad așa de mare este o problemă complicată și totodată fiind dificilă și cercetarea ei analitică. Această cale de soluționare a problemei este laborioasă, chiar folosind mașinile electronice de calcul.

Construirea domeniilor autoexcitării unui sistem complex este indicat să se facă cu ajutorul metodei frecvențelor; în acest caz, așa după cum s-a menționat mai sus, nu este nevoie să se deducă ecuația caracteristică în formă generală.

Construirea, prin această metodă, a zonelor de autoexcitare a mașinilor în sistemul ce are două centrale legate între ele prin x_C, R și printr-un cuadripol pasiv C este reprezentată în fig. 4.1.

Pentru obținerea ecuației caracteristice scriem ecuațiile proceselor tranzitorii în toate elementele sistemului. Ecuațiile diferențiale pentru fiecare fază k a cuadripolului C vor avea forma:

$$U_{1k}(p) = Z_{11}(p)\, i_{1k}(p) + Z_{12}(p) i_{2k}(p);$$

$$U_{2k}(p) = Z_{21}(p)\, i_{1k}(p) + Z_{22}(p) i_{2k}(p).$$

Scanned with OKEN Scanner

Acest sistem de ecuații poate fi transformat, introducînd axele d, q legate rigid de rotorul uneia dintre mașini. Se admite că sistemul de coordonate d, q al cuadripolului C

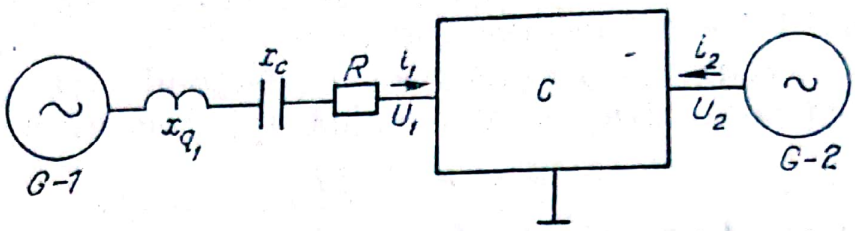


Fig. 4.1. Schema sistemului cu două centrale legate prin capacitate și cuadripolul C.

este imobil față de axele primei mașini. În această situație, ecuațiile circuitelor statice ale sistemului se vor scrie sub formă matricială :

$$\begin{Vmatrix} U_{d1}(p) \\ U_{q1}(p) \\ U_{d2}(p) \\ U_{q2}(p) \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} A_{11}(p)B_{11}(p) & A_{12}(p)B_{12}(p) \\ -B_{11}(p)A_{11}(p) & -B_{12}(p)A_{21}(p) \\ A_{21}(p)B_{21}(p) & A_{22}(p)B_{22}(p) \\ -B_{21}(p)A_{21}(p) & -B_{22}(p)A_{22}(p) \end{Vmatrix} \times$$

$$\times \begin{Vmatrix} i_{d1}(p) \\ i_{q1}(p) \\ i_{d2}(p) \\ i_{q2}(p) \end{Vmatrix} \tag{4.2}$$

Ecuațiile Park-Gorev pentru mașina sincronă $G-1$ și linia de transport x_C și R pot fi scrise astfel :

$$\left.\begin{aligned} U_{d1}(p) &= -\left[p x_{d1}(p) + R + \frac{x_C p}{p^2+1}\right] i_{d1}(p) + \\ &+ \left[x_{q1}(p) - \frac{x_C}{p^2+1}\right] i_{q1}(p) = M_1(p) i_{d1}(p) + \\ &+ N_1 p i_{q1}(p); \\ U_{q1}(p) &= \left[x_{d1}(p) - \frac{x_C}{p^2+1}\right] i_{d1}(p) - \left[p x_{q1}(p) + R + \right. \\ &\left. + \frac{x_C p}{p^2+1}\right] i_{q1}(p) = L_1(p) i_{d1}(p) + K_1(p) i_{q1}(p). \end{aligned}\right\} \tag{4.3}$$

Ecuațiile Park-Gorev pentru mașina $G-2$ scrise în coordonatele d, q legate de rotorul celei de a doua mașini, se reprezintă astfel:

$$\left.\begin{aligned} U'_{d2} &= -\,p x_{d2}(p) i'_{d2}(p) - x_{q2}(p) i'_{q2}(p); \\ U'_{q2} &= x_{d2}(p) i'_{d2}(p) - p x_{q2}(p) i'_{q2}(p). \end{aligned}\right\} \qquad (4.4)$$

Ecuațiile de legătură a coordonatelor primei mașini și celei de a doua mașini sînt:

$$\left.\begin{aligned} U'_d &= U_d \cos\delta + U_q \sin\delta; \\ U'_q &= -\,U_d \sin\delta + U_q \cos\delta, \end{aligned}\right\} \qquad (4.5)$$

în care δ este unghiul dintre axele longitudinale ale mașinilor $G-1$ și $G-2$ ale centralei.

După transformarea relațiilor (4.4) și (4.5) se obțin expresiile:

$$\left.\begin{aligned} U_{d2}(p) = &-\{p[x_{d2}(p)\cos^2\delta + x_{q2}\sin^2\delta] + \\ &+ [x_{d2}(p) - x_{q2}(p)]\sin\delta\cos\delta\}\, i_{d2}(p) - \\ &-\{[x_{d2}(p)\sin^2\delta + x_{q2}(p)\cos^2\delta] + p[x_{d2}(p) - \\ &- x_{q2}(p)]\sin\delta\cos\delta\}\, i_{q2}(p) = M_2(p) i_{d2}(p) + \\ &+ N_2(p) i_{q2}(p); \\ U_{q2}(p) = &-\{-[x_{d2}(p)\cos^2\delta + x_{q2}(p)\sin^2\delta] + \\ &+ p[x_{d2}(p) - x_{q2}(p)]\sin\delta\cos\delta\}\, i_{d2}(p) - \\ &-\{p[x_{d2}(p)\sin^2\delta + x_{q2}(p)\cos^2\delta] - [x_{d2}(p) - \\ &- x_{q2}(p)]\sin\delta\cos\delta\}\, i_{q2}(p) - L_2(p) i_{d2}(p) + \\ &+ K_2(p) i_{q2}(p). \end{aligned}\right\} \qquad (4.6)$$

Relațiile (4.3) — (4.6) care dau expresiile bilanțului de tensiuni sub formă matricială a mașinilor $G-1$ și $G-2$ sînt

$$\begin{Vmatrix} U_{d1}(p) \\ U_{q1}(p) \\ U_{d2}(p) \\ U_{q2}(p) \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} M_1(p) & N_1(p) & 0 & 0 \\ L_1(p) & K_1(p) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_2(p) & N_2(p) \\ 0 & 0 & L_2(p) & K_2(p) \end{Vmatrix} \begin{Vmatrix} i_{d1}(p) \\ i_{q1}(p) \\ i_{d2}(p) \\ i_{q2}(p) \end{Vmatrix} \qquad (4.7)$$

Scanned with OKEN Scanner

Pentru determinarea condițiilor de autoexcitare în sistemul analizat, trebuie rezolvate, împreună ecuațiile matriciale (4.2) și (4.7) care exprimă legătura între curenții și tensiunile circuitelor statice (cuadripolul C) și mașinilor sincrone $G-1$ și $G-2$. Rezolvarea ecuațiilor (4.2) și (4.7) dă posibilitatea să găsim ecuația caracteristică a sistemului

$$D(p) = \begin{vmatrix} A_{11}(p) - M_1(p) & B_{11}(p) - N_1(p) & A_{12}(p) & B_{12}(p) \\ -B_{11}(p) - L_1(p) & A_{11}(p) - K_1(p) & -B_{12}(p) & A_{12}(p) \\ A_{21}(p) & B_{21}(p) & A_{22}(p) - M_2(p) & B_{22}(p) - N_2(p) \\ -B_{21}(p) & A_{21}(p) & -B_{22}(p) - L_2(p) & A_{22}(p) - K_2(p) \end{vmatrix} = 0, \tag{4.8}$$

în care :

$$A_{ik}(p) = \frac{1}{2}[Z_{ik}(p + j) + Z_{ik}(p - j)];$$

$$B_{ik}(p) = \frac{1}{2j}[Z_{ik}(p + j) - Z_{ik}(p - j)].$$

La limita domeniilor de autoexcitare în sistem se observă oscilații libere întreținute cu pulsația ω. Prin urmare, ecuația caracteristică (4.8) trebuie să aibă soluția $p = j\omega$.

După ce am introdus $p = j\,\omega$ în (4.8), obținem :

$$D(j\omega) = \begin{vmatrix} A_{11}(j\omega) - M_1(j\omega) & B_{11}(j\omega) - N_1(j\omega) & A_{12}(j\omega) & B_{12}(j\omega) \\ -B_{11}(j\omega) - L_1(j\omega) & A_{11}(j\omega) - K_1(j\omega) & -B_{12}(j\omega) & A_{12}(j\omega) \\ A_{21}(j\omega) & B_{21}(j\omega) & A_{22}(j\omega) - M_2(j\omega) & B_{22}(j\omega) - N_2(j\omega) \\ -B_{21}(j\omega) & A_{21}(j\omega) & -B_{22}(j\omega) - L_2(j\omega) & A_{22}(j\omega) - K_2(j\omega) \end{vmatrix} = 0. \tag{4.9}$$

La autoexcitare, frecvența oscilațiilor libere se situează între limitele 0 la -1, ceea ce corespunde regimului de generator. Fiecare element (4.9) reprezintă o funcție a caracteristicilor de frecvență $jx_d(j\omega)$ și $jx_q(j\omega)$ ale mașinilor sincrone și ale circuitelor statice ale sistemului

$$Z_{ik}[j(\omega + 1)]; \quad Z_{ik}[j(\omega - 1)].$$

unde $Z_{ik}[j(\omega \pm 1)$ sînt caracteristicile de frecvență ale reactanțelor mutuale ($i \neq k$) sau proprii ($i = k$) ale cuadripolului C al sistemului (fig. 4.1). Deoarece la frecvența ω a oscilațiilor libere, prin circuitele statorului trec curenți cu frecvența de $1 \pm \omega$, rezultă că argumentul caracteristicilor de frecvență al reactanțelor proprii și mutuale va fi $1 \pm \omega$.

Ultima afirmație se poate demonstra riguros. În ecuațiile diferențiale care exprimă procesul tranzitoriu în cuadripolul C (un element static) toate variabilele au argumentul p.

La trecerea de la axele fixe la axele d, q legate rigid de rotorul mașinii, variabilele trebuie înmulțite cu $e^{\pm j\omega_0 t}$ în sistemul de unități relative $\omega_0 = 1$. Conform teoremei, deplasării, la înmulțirea originalului cu exponențiala $e^{\pm j\omega_0 t}$, va trebui ca în planul imaginilor să adăugăm la argumentul p mărimea $\pm j\omega_0$, respectiv $\pm j$.

Întrucît mărimile variabile care se raportează la axele d, q sînt numai mărimi ce aparțin cuadripolului, reactanțele lui proprii și mutuale trebuie să aibă argumentul $p \pm j$ sau după înlocuirea $p = \pm j\omega$, va fi $Z_{ik}[j(\omega \pm 1)]$.

Caracteristicile de frecvență ale mașinilor sincrone au fost analizate în capitolul 2. Caracteristicile de frecvență ale circuitelor statice ale sistemului pot fi determinate, de asemenea, din expresii analitice sau deduse în mod experimental [1]. Prin urmare, caracteristicile de frecvență ale fiecărui element al determinantului (4.9) vor fi cunoscute.

Dacă se fixează parametrii x_C și R ai sistemului ca variabile (de obicei zonele de autoexcitare se construiesc în aceste coordonate), rezolvarea ecuației (4.9) în mărimi complexe pentru o frecvență ω luată în prealabil pentru oscilațiile

---

[1]) Dacă caracteristicile de frecvență ale tuturor elementelor sistemului, obținute prin una din metodele anterioare, le cunoaștem, atunci folosirea lor la construirea domeniilor autoexcitării micșorează timpul necesar pentru efectuarea calculelor.

Scanned with OKEN Scanner

libere dă un punct de pe frontiera domeniului de autoexcitare în coordonatele x_C și R. Acest lucru devine clar, dacă determinantul (4.9) este reprezentat prin ecuația

$$D(j\omega) = (a + jb)\, x_C^2 + (c + jd)R^2 + (e + jf)\, x_C + \\ + (g + jh)R + (l + jm)x_C R + (k + jn) = 0, \qquad (4.10)$$

în care a, b, c, d, e, f, g, h, l, m, k, n sînt mărimi reale. Ele depind de frecvența oscilațiilor proprii ale sistemului și sînt determinate de caracteristicile de frecvență ale tuturor elementelor sale (fig. 4.1).

Ecuația (4.10) scrisă în mărimi complexe poate fi împărțită în două ecuații în mărimi reale:

$$\left.\begin{aligned} ax_C^2 + cR^2 + ex_C + gR + lx_C R + k = 0; \\ bx_C^2 + dR^2 + fx_C + hR + mx_C R + n = 0. \end{aligned}\right\} \qquad (4.11)$$

Variind în (4.11) pe ω de la 0 pînă la -1, ceea ce se reflectă în valorile cifrice ale parametrilor a, b, c, d, e, f, g, h, l, m, k, n se poate construi zona autoexcitării *II* și *III* sincrone și asincrone.

Metoda frecvențelor folosită la calculul domeniilor autoexcitării se poate aplica pentru sistemele cu un număr oarecare de mașini electrice rotative. Totuși, această metodă este destul de laborioasă și, pentru calcule practice, este indicat să recomandăm o metodă de construire mai simplă a domeniilor autoexcitării, după ce facem unele aproximații.

Esența metodei simplificate de calcul a domeniilor de autoexcitare a mașinilor în sistemele complexe se bazează pe analiza puterilor sau cuplurilor electromagnetice ce acționează în primul stadiu al diverselor zone de autoexcitare.

Din punct de vedere energetic, autoexcitarea se dezvoltă datorită faptului că puterea creată în acest timp de către generatoare este mai mare decît puterea consumată pentru pierderi. Limitele domeniilor de autoexcitare sînt determinate de bilanțul acestor puteri. De exemplu, în zona *I*, procesul se dezvoltă sub acțiunea cuplului de reacție al mașinii cu poli aparenți. Cuplul de reacție (puterea) poate să apară la mașina sincronă la diverse reactanțe sincrone inductive longitudinală x_d și transversală x_q și cu condiția ca la barele ei să fie tensiune. Cuplul de reacție apare în mașină

Scanned with OKEN Scanner

independent dacă este sau nu excitată. Prin urmare, în acest caz, toate circuitele rotoarelor pot fi presupuse deschise.

Autoexcitarea asincronă în zona *II*, pe frontiera căreia frecvența oscilațiilor este aproape de cea de sincronism, apare de regulă datorită cuplului dinamic de reacție. Acest cuplu apare la valori mari (teoretic, infinit de mari) ale constantelor de timp ale înfășurării de excitație, în cazul cînd există cuplaj magnetic de tip transformator între circuitele statorului și rotorului (adică în cazul că nu există alunecare între cîmpul rotorului și cîmpul statorului). Constantele de timp mari ale înfășurării de excitație atrag după sine amortizarea lentă a proceselor tranzitorii din înfășurare. În acest caz, reactanța inductivă de-a lungul axei longitudinale a mașinii, unde este amplasată înfășurarea de excitație, corespunde reactanței tranzitorii x_d'. Pe axa transversală nu există înfășurare de excitație și reactanța mașinii de-a lungul acestei axe va fi egală cu x_q. Din cauza inegalității reactanțelor de pe ambele axe ale mașinii, în timpul procesului tranzitoriu din înfășurarea de excitație și în cazul cînd la bornele mașinii există tensiune, apare un cuplu de reacție dinamic.

În zona *III*, autoexcitarea apare datorită cuplului asincron al mașinii. La limita zonei *III*, frecvența oscilațiilor libere din circuitul statorului este egală cu $(1-s)$, unde s este alunecarea rotorului în raport cu cîmpul statorului.

Deoarece în zonele *I*, *II*, *III* autoexcitarea are naturi deosebite, metodele de determinare a limitelor acestor zone sînt deosebite.

Ținînd seama de cele spuse, se poate recomanda determinarea frontierelor domeniilor *I* și *II* de autoexcitare, neglijînd procesele tranzitorii în circuitele statorice, iar limita zonei *III* prin schimbarea mașinilor sincrone cu mașini asincrone, avînd caracteristici de frecvență medii de-a lungul axelor d și q:

$$jx(-js) = \frac{j}{2}[x_d(-js) + x_q(-js)] =$$

$$= \frac{1}{2}[R_d(s) + R_q(s)] + \frac{j}{2}[X_d(s) + X_q(s)]. \qquad (4.12)$$

Posibilitatea unei asemenea reprezentări a mașinilor este fundamentată în capitolul 2. La $s \geqslant 0{,}2$ caracteris-

Scanned with OKEN Scanner

ticele de frecvenţă ale maşinilor cu înfăşurări de amortizare pe axele d şi q practic coincid (fig. 2,15, b), adică maşina sincronă se comportă ca şi cînd ar avea rotor simetric, fapt caracteristic maşinilor asincrone.

Reprezentarea maşinilor sincrone sub formă de asincrone dă posibilitatea, la fel ca în cazul sistemului simplu, să se reducă sistemul dinamic ce include în el maşini sincrone la o schemă statică, iar calculul domeniului *III* al autoexcitării asincrone să se reducă la determinarea condiţiilor de rezonanţă în această schemă.

Determinarea domeniilor *I*, *II*, *III* de autoexcitare prin metoda exactă (de frecvenţă) şi simplificată este reprezentată în schema din fig. 4.2. Centrala situată la distanţă debitează prin linie de transport ce are compensare capacitivă longitudinală pe un sistem de putere limitată care este reprezentat de maşina sincronă echivalentă *G*-2.

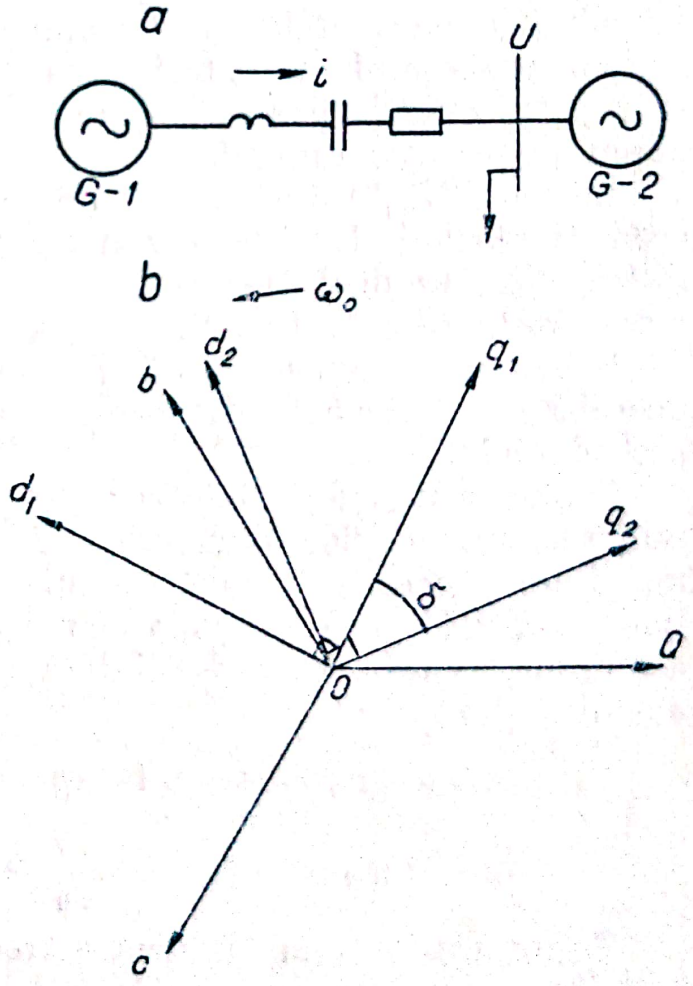


Fig. 4.2. Schema sistemului cu două maşini cu poli aparenţi legate prin capacitate:

a — schema echivalentă; *b* — poziţia axelor *d*, *q* ale ambelor maşini.

Determinarea zonelor de autoexcitare prin metoda frecvențelor. Dacă caracteristicile de frecvență $jx_{d1}(j\omega)$, $jx_{q1}(j\omega)$ (fig. 4.3) și $jx_{d2}(j\omega)$, $jx_{q2}(j\omega)$ (fig. 4.4) ale hidrogeneratoarelor sînt cunoscute, ecuația caracteristică a sistemului corespunzătoare relației (4.7) are forma

$$\begin{aligned} D(p) = (p^2+1)^2 \{ & x_{d1}(p)x_{q1}(p) + x_{d2}(p)x_{q2}(p) + \\ & + [x_{d1}(p)x_{q1}(p) + x_{d2}(p)x_{q2}(p)] \sin^2\delta + [x_{d1}(p)x_{q2}(p) + \\ & + x_{d2}(p)x_{q1}(p)] \cos^2\delta\} + [(p^2-1)(Rp + x_C) + \\ & + 2Rp][x_{d1}(p) + x_{q1}(p) + x_{d2}(p) + x_{q2}(p)] + (Rp + x_C)^2 + R^2 = 0 \end{aligned} \tag{4.13}$$

[deducerea ecuației (4.13) este dată în anexa 4].

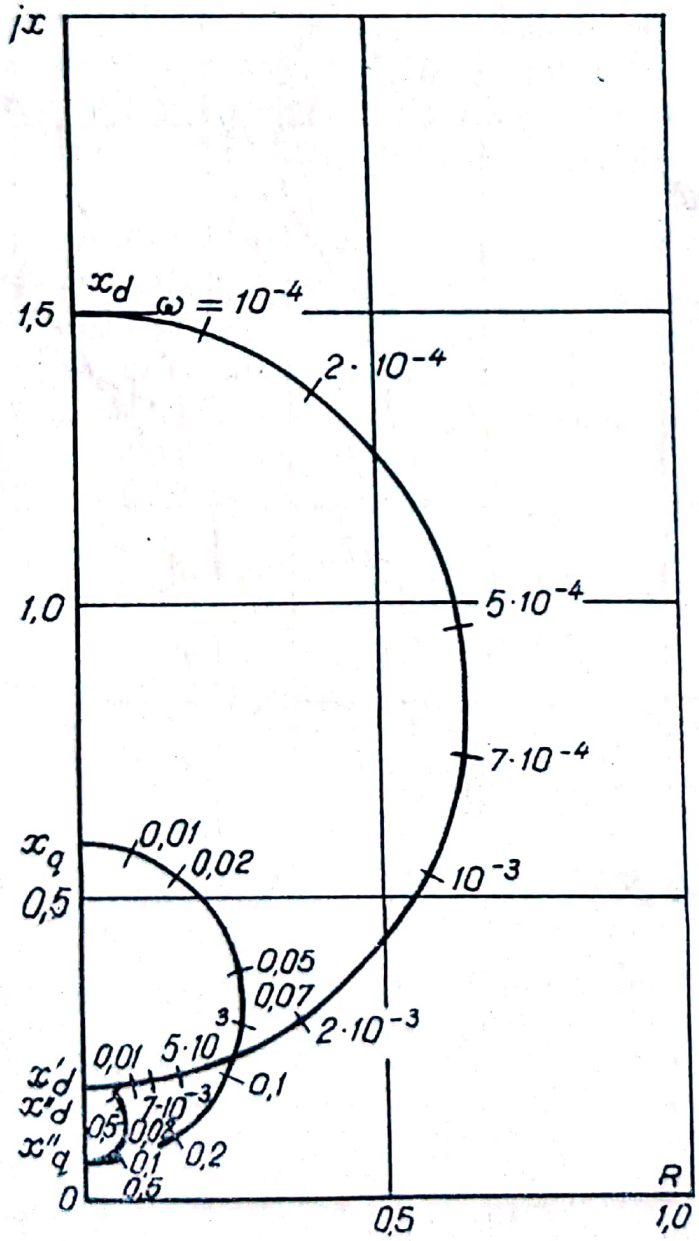


Fig. 4.3. Caracteristica de frecvență a unei mașini sincrone cu poli aparenți. Parametrii hidrogeneratorului G-1;

$x_d = 1{,}5$; $x_q = 0{,}6$; $x'_d = 0{,}2$; $x''_d = 0{,}072$; $x_1 = 0{,}086$; $x''_q = 0{,}069$; $T_{d0} = 1670$ rad; $T_D = 16{,}7$ rad.; $T_Q = 16{,}7$ rad; $\sigma_{dD} = 382$ rad.

Introducînd în (4.13) $p = j\omega$ și separînd partea reală de cea imaginară, se obține sistemul de două ecuații patratice în raport cu x_C și R de forma (4.11), în care toți coeficienții sînt funcții de ω. După ce s-au determinat apoi valorile coeficienților în aceste ecuații la diverse valori ω (în gama de la 0 pînă la -1), se rezolvă prin metoda numerică ecuațiile pentru frecvența adoptată ω a oscilațiilor libere.

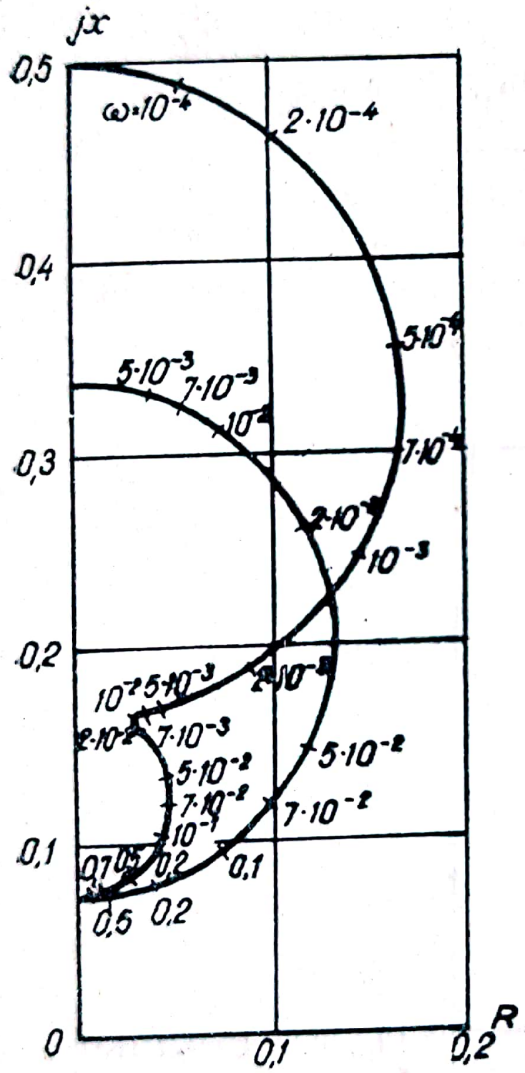


Fig. 4.4. Caracteristica de frecvență a mașinii sincrone cu poli aparenți G-2, avînd parametrii:

$x_d = 0{,}5$; $x_q = 0{,}338$; $x'_d = 0{,}169$; $x''_d = 0{,}072$; $x_1 = 0{,}0862$; $x''_q = 0{,}069$; $T_{d0} = 1730$ rad; $T_D = 37{,}2$ rad; $T_Q = 31{,}3$ rad; $\sigma_{dD} = 0{,}382$.

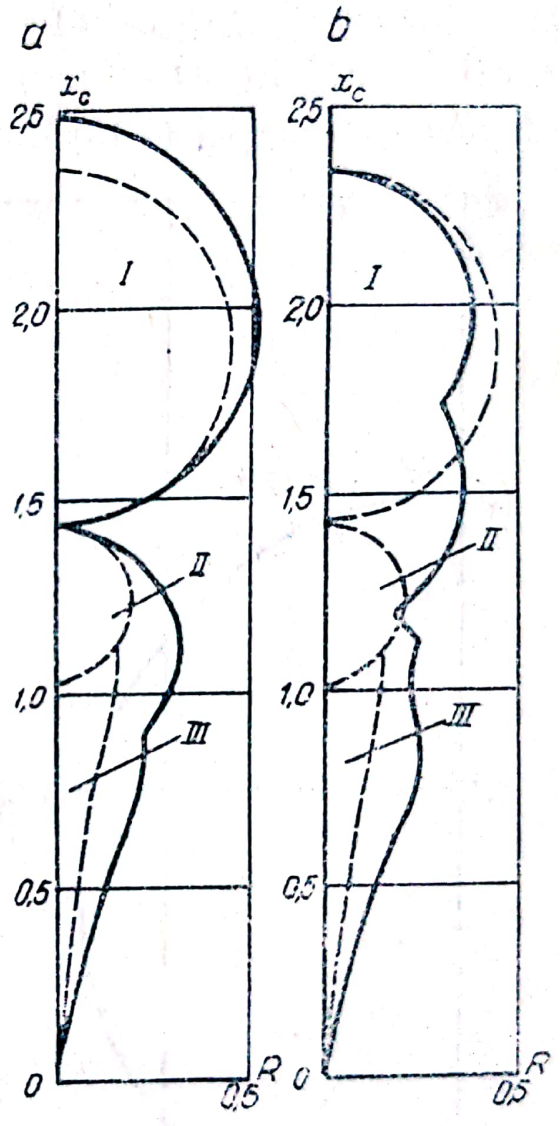


Fig. 4.5. Zonele de autoexcitare în sistemul reprezentat în fig. 4.2 la diverse unghiuri:

a — $\delta_{12} = 0°$; b — $\delta_{12} = 90°$

— — — obținute prin schimbarea sistemului receptor cu bare de tensiune constantă după reactanța x_{q2}; ——— obținute din ecuația caracteristică completă prin metoda frecvențelor.

Fiecare soluție a sistemului de ecuații (4.11) dă un singur punct pe frontiera zonei de autoexcitare în coordonatele x_c și R la frecvența dată ω.

Domeniile de autoexcitare, construite prin metoda frecvențelor, pentru generatoarele G-1 care funcționează după schema reprezentată în fig. 4.2 la unghiurile $\delta = 0°$ și $\delta = 90°$, se dau în fig. 4.5 (cu linii continue). Comparînd domeniile de autoexcitare la aceste unghiuri δ, se observă că unghiul de divergență a rotoarelor mașinilor care reflectă regimul de lucru al sistemului schimbă esențial frontiera superioară a zonei de autoexcitare sincronă ($x_C \geqslant 2{,}5$) și practic nu influențează frontiera zonei III a autoexcitării asincrone. Aceasta se explică prin aceea că puterea de reacție dezvoltată de mașinile sincrone depinde de unghiul δ, iar puterea asincronă a mașinilor nu este funcție de unghiul δ, îndeosebi la alunecări mari, cînd asimetria rotoarelor de pe axele d și q se atenuează.

Determinarea zonelor de autoexcitare prin metoda simplificată. Pentru comparație se determină zonele de autoexcitare în aceeași schemă prin metoda simplificată. În acest caz, la construirea zonelor I și II de autoexcitare nu se mai iau în considerare procesele tranzitorii din stator.

Cu aproximațiile făcute se poate obține următoarea ecuație caracteristică a sistemului

$$D'(p) = \{x_{d1}(p)\, x_{q1}(p) + x_{d2}(p)\, x_{q2}(p) + [x_{d1}(p)\, x_{d2}(p) + x_{q1}(p)\, x_{q2}(p)]\sin^2\delta + [x_{d1}(p)\, x_{q2}(p) + x_{q1}(p)\, x_{d2}(p)]\cos^2\delta\} - x_C[x_{d1}(p) + x_{d2}(p) + x_{q1}(p) + x_{q2}(p)] + x_C^2 + R^2 = 0. \qquad (4.14)$$

Dacă pe rotorul fiecărui hidrogenerator există numai un singur circuit închis al înfășurării de excitație, ecuația caracteristică [1]) se poate scrie definitiv astfel:

$$a'_4 p^2 + a'_5 p + a'_6 = 0;$$

---

[1]) În cazul cînd nu se iau în considerare procesele tranzitorii din stator, gradul ecuației caracteristice este egal cu numărul circuitelor necuplate electric între ele de pe rotorul tuturor mașinilor. În această situație, în ecuația (4.1) $l = 0$. Deducerea ecuației (4.14) se arată în anexa 4.

Scanned with OKEN Scanner

$$a'_4 = T_{d01}T_{d02}\{[x'_{d1}x_{q1} + x'_{d2}x_{q2} + (x'_{d1}x'_{d2} + x_{q1}x_{q2})\sin^2\delta + (x'_{d1}x_{q2} + x'_{d2}x_{q1})\cos^2\delta - x_C(x'_{d1} + x'_{d2} + x_{q1} + x_{q2}) + R^2 + x_C^2\}; \quad (4.15)$$

$$a'_5 = T_{d01}\{[x'_{d1}x_{q1} + x_{d2}x_{q2} + (x'_{d1}x_{d2} + x_{q1}x_{q2})\sin^2\delta + (x'_{d1}x_{q2} + x_{d2}x_{q1})\cos^2\delta] - x_C(x'_{d1} + x_{d2} + x_{q1} + x_{q2}) + R^2 + x_C^2\} + T_{d02}\{[x_{d1}x_{q1} + x'_{d2}x_{q2} + (x_{d1}x'_{d2} + x_{q1}x_{q2})\sin^2\delta + (x_{d1}x_{q2} + x'_{d2}x_{q1})\cos^2\delta] - x_C(x_{d1} + x'_{d2} + x_{q1} + x_{q2}) + R^2 + x_C^2\};$$

$$a'_6 = x_{d1}x_{q1} + x_{d2}x_{q2} + (x_{d1}x_{d2} + x_{q1}x_q)\sin^2\delta + (x_{d1}x_{q2} + x_{d2}x_{q1})\cos^2\delta - x_C(x_{d1} + x_{d2} + x_{q1} + x_{q2}) + R^2 + x_C^2.$$

Cercetarea ecuației (4.15) din punct de vedere al stabilității este simplă și se poate face cu oricare dintre procedeele cunoscute.

Zonele *I* și *II* de autoexcitare obținute din ecuația (4.15) sînt reprezentate în fig. 4.6 sub forma a două ($\delta = 0°$) sau trei ($\delta = 90°$) semicercuri.

Pentru construirea acestor curbe este suficient să se egaleze, pe rînd cu zero, coeficienții a'_4, a'_5 și a'_6 și să se găsească două valori x_C pentru $R = 0$

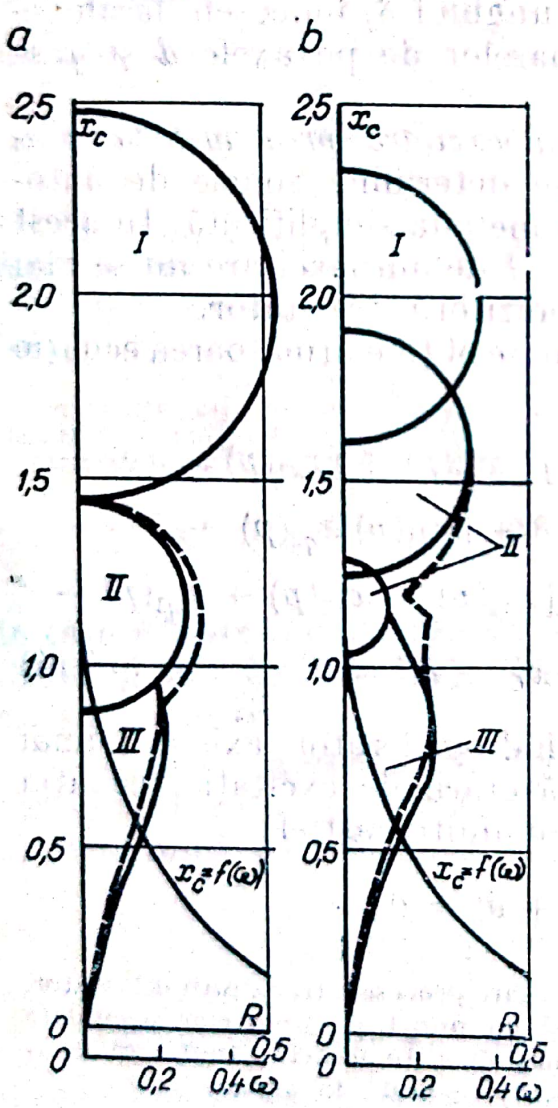


Fig. 4.6. Zonele de autoexcitare în sistemul cu două centrale:

a — unghiul $\delta_{12} = 0$; *b* — unghiul $\delta_{12} = 90°$ — — — zonele *II*, *III* s-au determinat din ecuația caracteristică completă; — zona *II* s-a determinat fără a ține seama de procesele tranzitorii din stator, iar zona *III* din analiza rezonanței în schema cu elemente statice.

Zona *III* a autoexcitării se calculează după ce se înlocuiesc maşinile sincrone cu maşini asincrone, avînd caracteristici de frecvenţă medii de-a lungul axelor d şi q. În această situaţie, sistemul complet dinamic se transformă într-o schemă cu elemente statice (fig. 4.7). Frontiera zonei *III* de autoexcitaţie în schema analizată corespunde condiţiilor de apariţie a oscilaţiilor libere în schema statică (fig. 4.7) şi se află din expresiile :

$$\left.\begin{aligned} R &= -\operatorname{Re}[Z_{G1}(\omega) + Z_{G2}(\omega)] = \\ &= -\operatorname{Re}(1-\omega)\left[\frac{jx_{d1}(-j\omega) + jx_{q1}(-j\omega)}{2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{jx_{d2}(-j\omega) + jx_{q2}(-j\omega)}{2}\right]; \\ x_C &= (1-\omega)\operatorname{Im}[Z_{G1}(\omega) + Z_{G2}(\omega)]. \end{aligned}\right\} \quad (4.16)$$

Zona *III* a autoexcitării asincrone, construită prin metoda simplificată menţionată, este reprezentată în fig. 4.6. Tot acolo sînt reprezentate, prin curbe punctate, domeniile de autoexcitare care au fost obţinute din analiza ecuaţiei caracteristice complete (4.13) prin metoda frecvenţelor.

Analizînd rezultatele calculelor de construire a domeniilor de autoexcitare obţinute prin metodele de calcul exactă (de frecvenţe) şi simplificată, se observă că zonele *I* de autoexcitare sincronă, obţinute prin cele două metode menţionate, coincid în întregime. Zona *II* a autoexcitării asincrone, obţinută prin metoda simplificată, este ceva mai mică decît cea reală. Acest lucru are două cauze. În primul rînd, în ecuaţia (4.15) nu a fost luată în considerare influenţa înfăşurărilor de amortizare şi în al doilea rînd nu s-a considerat puterea suplimentară asincronă dezvoltată de maşina sincronă la alunecări mici. Astfel, dispare partea din zona *II* de autoexcitare asincronă, si-

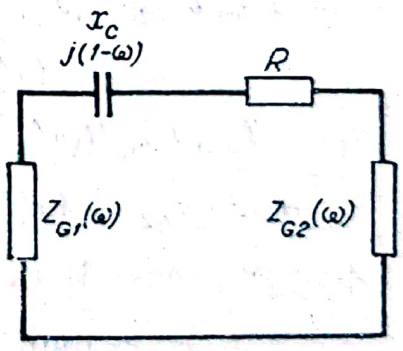


Fig. 4.7. Schema echivalentă cu elemente statice folosită la determinarea zonei *III* de autoexcitare asincronă pentru schema reprezentată în fig. 4.2.

tuată în apropierea limitei de autoexcitare repulsivă — sincronă.

Zona *III* de autoexcitare asincronă, obținută prin metodă simplificată, este puțin mai largă decît cea reală. Aceasta se explică prin renunțarea la pierderile suplimentare de putere activă produse de componenta variabilă a puterii asincrone în sistem.

Calculele efectuate arată că eroarea făcută prin construirea domeniilor de autoexcitare prin metoda simplificată are o valoare mică în toate domeniile autoexcitării. Deci, metoda propusă de determinare a domeniilor de autoexcitare din sistemul electric complex este o metodă corectă.

Pentru convingerea definitivă asupra justeții metodei adoptate, se compară ecuațiile după care au fost găsite zonele *I* și *II* de autoexcitare prin metodele exactă și aproximativă.

Ecuația caracteristică completă (4.13) a sistemului (fig.4.2) în cazul în care lipsesc înfășurările de amortizare pe rotoarele mașinilor *G*—1 și *G*—2 și cînd

$$x_{d1}(p) = \frac{x_{d1} + T_{d01}px'_{d1}}{1 + pT_{d01}}; \quad x_{d2}(p) = \frac{x_{d2} + T_{d02}px'_{d2}}{1 + pT_{d02}},$$

poate fi scrisă în felul următor

$$a_0p^6 + a_1p^5 + a_2p^4 + a_3p^3 + a_4p^2 + a_5p + a_6 = 0, \quad (4.17)$$

unde:

$$a_0 = T_{d01}T_{d02}[x'_{d1}x_{q1} + x'_{d2}x_{q2} + (x'_{d1}x'_{d2} + x_{q1}x_{q2})\sin^2\delta + (x'_{d1}x_{q2} + x'_{d2}x_{q1})\cos^2\delta];$$

$$a_1 = T_{d01}T_{d02}R(x'_{d1} + x'_{d2} + x_{q1} + x_{q2}) + T_{d01}[x'_{d1}x_{q1} + x_{d2}x_{q2} + (x'_{d1}x_{d2} + x_{q1}x_{q2})\sin^2\delta + (x'_{d1}x_{q2} + x_{d2}x_{q1})\cos^2\delta] + T_{d02}[x_{d1}x_{q1} + x'_{d2}x_{q2} + (x_{d1}x'_{d2} + x_{q1}x_{q2})\sin^2\delta + (x_{d1}x_{q2} + x'_{d2}x_{q1})\cos^2\delta];$$

$$a_2 = 2T_{d10}T_{d20}[x'_{d1}x_{q1} + x'_{d2}x_{q2} + (x'_{d1}x'_{d2} + x_{q1}x_{q2})\sin^2\delta + (x'_{d1}x_{q2} + x'_{d2}x_{q1})\cos^2\delta] + T_{d10}T_{d20}[R^2 + x_C(x'_{d1} + x'_{d2} + x_{q1} + x_{q2})] + T_{d10}R(x'_{d1} + x_{d2} + x_{q1} + x_{q2}) +$$

$$+ T_{d20}R(x_{d1} + x'_{d2} + x_{q1} + x_{q2}) + [x_{d1}x_{q1} + x_{d2}x_{q2} +$$
$$+ (x_{d1}x_{d2} + x_{q1}x_{q2}) \sin^2 \delta + (x_{d1}x_{q2} + x_{d2}x_{q1}) \cos^2 \delta];$$

$$a_3 = T_{d10}T_{d20}R[x'_{d1} + x'_{d2} + x_{q1} + x_{q2} + 2x_C] + T_{d10}\{2[x'_{d1}x_{q1} +$$
$$+ x_{d2}x_{q2} + (x'_{d1}x_{d2} + x_{q1}x_{q2}) \sin^2 \delta + (x'_{d1}x_{q2} +$$
$$+ x_{d2}x_{q1}) \cos^2 \delta] + x_C(x'_{d1} + x_{d2} + x_{q1} + x_{q2}) + R^2\} +$$
$$+ T_{d20}\{2[x_{d1}x_{q1} + x'_{d2}x_{q2} + (x_{d1}x'_{d2} + x_{q1}x_{q2}) \sin^2 \delta +$$
$$+ (x_{d1}x_{q2} + x'_{d2}x_{q1}) \cos^2 \delta + x_C(x_{d1} + x'_{d2} + x_{q1} + x_{q2}) +$$
$$+ R^2\} + R(x_{d1} + x_{d2} + x_{q1} + x_{q2});$$

$$a_4 = T_{d10}T_{d20}[x'_{d1}x_{q1} + x'_{d2}x_{q2} + (x'_{d1}x'_{d2} + x_{q1}x_{q2}) \sin^2\delta +$$
$$+ (x'_{d1}x_{q2} + x'_{d2}x_{q1}) \cos^2 \delta - x_C(x'_{d1} + x'_{d2} + x_{q1} + x_{q2}) +$$
$$+ x^2_C + R^2] + T_{d10}R(x'_{d1} + x_{d2} + x_{q1} + x_{q2} + 2x_C) +$$
$$+ T_{d20}R(x_{d1} + x'_{d2} + x'_{q1} + x_{q2} + 2x_C) + 2[x_{d1}x_{q1} +$$
$$+ x_{d2}x_{q2} + (x_{d1}x_{d2} + x_{q1}x_{q2}) \sin^2 \delta + (x_{d1}x_{q2} +$$
$$+ x_{d2}x_{q1}) \cos^2 \delta] + x_C(x_{d1} + x_{d2} + x_{q1} + x_{q2}) + R^2;$$

$$a_5 = T_{d10}[x'_{d1}x_{q1} + x_{d2}x_{q2} + (x'_{d1}x_{d2} + x_{q1}x_{q2}) \sin^2 \delta +$$
$$+ (x'_{d1}x_{q2} + x_{d2}x_{q1}) \cos^2 \delta - x_C(x'_{d1} + x_{d2} + x_{q1} + x_{q2}) +$$
$$+ x^2_C + R^2] + T_{d20}[x_{d1}x_{q1} + x'_{d2}x_{q2} + (x_{d1}x'_{d2} +$$
$$+ x_{q1}x_{q2}) \sin^2 \delta + (x_{d1}x_{q2} + x'_{d2}x_{q1}) \cos^2\delta - x_C(x_{d1} + x'_{d2} +$$
$$+ x_{q1} + x_{q2}) + x^2_C + R^2] + R[(x_{d1} + x_{d2} + x_{q1} +$$
$$+ x_{q2} + 2x_C)];$$

$$a_6 = x_{d1}x_{q1} + x_{d2}x_{q2} + (x_{d1}x_{d2} + x_{q1}x_{q2}) \sin^2 \delta + (x_{d1}x_{q2} +$$
$$+ x_{d2}x_{q1}) \cos^2 \delta - x_C(x_{d1} + x_{d2} + x_{q1} + x_{q2}) + x^2_C + R^2.$$

Comparînd ecuațiile caracteristice completă (4.17) și simplificată (4.15) ale sistemului, se observă că în ecuația (4.15) lipsesc termenii cu puterile cele mai mari a_0, a_1, a_2, a_3, și unele mărimi mici la restul coeficienților; de exemplu la coeficientul a'_5 lipsește componenta $R(x_{d1} + x_{d2} + x_{q1} +$

$+ x_{q2} + 2x_C$) care este de aproape o mie de ori mai mică decît restul mărimilor care definesc pe a_5. Neglijarea unei asemenea componente atît de mici nu introduce erori esenţiale în calcul. Din ecuaţia (4.17) se vede că coeficienţii a_0, a_1, a_2, a_3 au aceeaşi situaţie ca şi coeficientul a_4. Însă din cauză că la determinarea zonei *II* de autoexcitare, alunecarea cîmpului statorului faţă de rotor nu depăşeşte 0,01 (fig.4.6), coeficienţii a_0, a_1, a_2, a_3, după înlocuirea $p = j\omega$, sînt de sute de ori mai mici decît a_4. Prin urmare şi ei pot fi neglijaţi la determinarea limitei zonei *II* de autoexcitare.

După aproximaţiile făcute şi simplificările respective în (4.17), ecuaţiile (4.15) şi (4.17) coincid, adică domeniile de autoexcitare determinate de ambele ecuaţii trebuie să fie aceleaşi.

Termenii liberi ai ecuaţiilor (4.15) şi (4.17) au aceeaşi expresie $a_6 = a'_6$. Deci domeniul autoexcitării sincrone va fi acelaşi, independent de faptul dacă el a fost determinat sau nu prin metoda aproximativă sau cea exactă.

Se subliniază că rezultatele de calcul confirmă, de asemenea, ipoteza că în sistemul complex cu mai multe maşini (fig. 4.2), domeniile *II* şi *III* de autoexcitare sînt mai largi decît în sistemul simplu „centrală-bare". În fig. 4.5 sînt reprezentate, prin curbe punctate, domeniile *I*, *II*, *III* de autoexcitare la schimbarea sistemului receptor cu reactanţa inductivă echivalentă x_{q2} (în acest caz schema se transformă în sistemul simplu „centrală-bare").

Comparînd domeniile de autoexcitare ale schemei complexe şi simple se remarcă că luarea în considerare a proceselor electromagnetice ce au loc în sistemul receptor duce la lărgirea domeniilor *II* şi *III* de autoexcitare. Acest lucru se datoreşte faptului că în schema cu două maşini, puterile de reacţie şi asincronă, datorită cărora se dezvoltă autoexcitarea, sînt create de două maşini şi nu de una.

Calculele arată, de asemenea, că domeniul *II* de autoexcitare, determinat prin metoda exactă prin considerarea la maşini a înfăşurării de amortizare longitudinală şi transversală, nu este cu mult mai larg decît domeniul *II* obţinut prin metoda simplificată pentru maşinile fără înfăşurări de amortizare (fig. 4.6). Prin urmare, este posibil să se neglijeze înfăşurările de amortizare de pe rotor la construirea

Scanned with OKEN Scanner

domeniului *II* de autoexcitare fără considerarea proceselor tranzitorii din circuitul statoric. Ultima aproximație simplifică mult calculul fără a introduce erori apreciabile.

Metoda simplificată propusă, de verificare a sistemelor complexe la autoexcitare, s-a ilustrat prin efectuarea unei aplicații la o schemă cu două mașini; folosirea ei este mai eficientă pentru schemele cu 3—4 sau chiar mai multe mașini.

Calculele efectuate pentru construirea domeniilor de autoexcitare în asemenea sisteme au arătat că diferența între domeniile obținute prin metoda precisă și cea aproximativă nu depășește 10%.

Determinarea domeniilor *I* și *II* de autoexcitare în sistemul complex fără a considera procesele tranzitorii din stator, poate fi simplificată și mai mult dacă la construirea zonelor de autoexcitare se reușește să nu mai fie folosită ecuația caracteristică a sistemului, a cărei deducere implică dificultăți mari și calcule laborioase.

Renunțarea la considerarea proceselor tranzitorii din circuitele statorice dă posibilitatea să se fundamenteze din punct de vedere fizic condiția pentru apariția autoexcitării în zonele *I* și *II* și să se determine aceste zone fără deducerea ecuației caracteristice a sistemului. Construirea domeniilor *I* și *II* de autoexcitare fără deducerea ecuației caracteristice și fără a considera procesele tranzitorii din stator, pentru un exemplu cu trei centrale este reprezentată în fig. 4.8

În domeniile *I* și *II* autoexcitarea ia naștere datorită puterii suplimentare de reacție generată de mașinile sincrone. Frontiera zonei de autoexcitare corespunde bilanțului de puteri produse de generatoare și pierderile în sistem.

În schema complexă, regimul sincron stabilizat apare la frontiera zonei *I* de autoexcitare sincronă; acest regim poate fi exprimat pentru sistemul analizat cu ecuațiile:

$$\left.\begin{aligned} \dot{I}_1 &= Y_{11}\dot{E}_{Q1} - Y_{12}\dot{E}_{Q2} - Y_{13}\dot{E}_{Q3}; \\ \dot{I}_2 &= -Y_{21}\dot{E}_{Q1} + Y_{22}\dot{E}_{Q2} - Y_{23}\dot{E}_{Q3}; \\ \dot{I}_3 &= -Y_{31}\dot{E}_{Q1} - Y_{32}\dot{E}_{Q2} + Y_{33}\dot{E}_{Q3}, \end{aligned}\right\} \qquad (4.18)$$

Scanned with OKEN Scanner

în care y_{11}, Y_{12}, Y_{13} sînt admitanțele proprii și mutuale ale sistemului (în complex) (fig. 4.8, *a*) unde mașinile sincrone sînt reprezentate prin t.e.m. E_Q de după reactanța x_q.

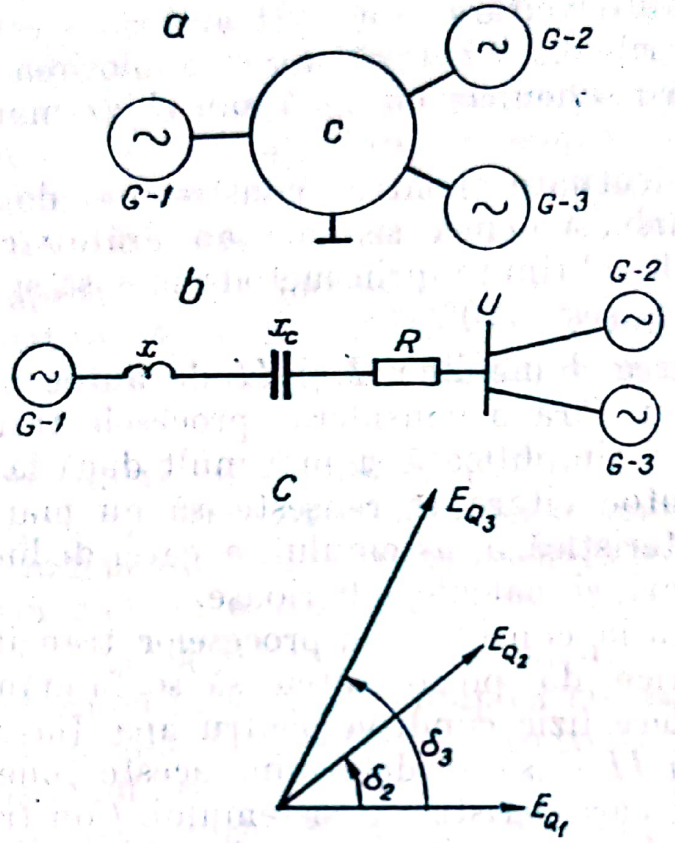


Fig. 4.8. Schema sistemului cu trei centrale:
a — legătura oarecare între generatoarele centralelor; *b* — centrala depărtată este legată cu centralele sistemului receptor prin inductanță, capacitate și rezistență; *c* — diagrama vectorilor t.e.m.

Luînd în considerare amplasarea mutuală a rotoarelor mașinilor din (4.18) se pot obține componentele longitudinale ale curenților din acestea sub formă matricială:

$$\begin{Vmatrix} I_{d1} \\ I_{d2} \\ I_{d3} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} y_{11}\sin\varphi_{11} & -y_{12}\sin(\varphi_{12}+\delta_{12}) & -y_{13}\sin(\varphi_{13}+\delta_{13}) \\ -y_{21}\sin(\varphi_{21}+\delta_{21}) & y_{22}\sin\varphi_{22} & -y_{23}\sin(\varphi_{23}+\delta_{23}) \\ -y_{31}\sin(\varphi_{31}+\delta_{31}) & -y_{32}\sin(\varphi_{32}+\delta_{32}) & y_{33}\sin\varphi_{33} \end{Vmatrix} \begin{Vmatrix} E_{Q1} \\ E_{Q2} \\ E_{Q3} \end{Vmatrix} \qquad (4.19)$$

unde y_{11}, y_{22}, y_{12}, y_{23} etc. sînt modulele admitanțelor proprii și mutuale;

φ_{11}, φ_{22}, φ_{12}, φ_{23} — argumentele lor.

T.e.m. E_{Q1}, E_{Q2}, E_{Q3} sînt legate de componentele longitudinale ale curenților prin relațiile cunoscute:

$$\left.\begin{aligned} E_{Q1} &= E_{d1} - I_{d1}(x_{d1} - x_{q1}); \\ E_{Q2} &= E_{d2} - I_{d2}(x_{d2} - x_{q2}); \\ E_{Q3} &= E_{d3} - I_{d3}(x_{d3} - x_{q3}). \end{aligned}\right\} \qquad (4.20)$$

La deducerea domeniilor de autoexcitare interesează regimul oscilațiilor libere, adică regimul în care nu există perturbări externe $E_{d1} = E_{d2} = E_{d3} = 0$.

În acest caz, relația (4.20) se poate scrie matricial astfel:

$$\begin{Vmatrix} E_{Q1} \\ E_{Q2} \\ E_{Q3} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} x_{d1} - x_{q1} & 0 & 0 \\ 0 & x_{d2} - x_{q2} & 0 \\ 0 & 0 & x_{d3} - x_{q3} \end{Vmatrix} \begin{Vmatrix} I_{d1} \\ I_{d2} \\ I_{d3} \end{Vmatrix}. \qquad (4.21)$$

După ce s-au eliminat din ecuațiile matriciale (4.19) și (4.21) mărimile E_{Q1}, E_{Q2}, E_{Q3}, obținem o nouă ecuație:

$$\left\{\begin{Vmatrix} y_{11}\sin\varphi_{11} & -y_{12}\sin(\varphi_{12}+\delta_{12}) & -y_{13}\sin(\varphi_{13}+\delta_{13}) \\ -y_{21}\sin(\varphi_{21}+\delta_{21}) & y_{22}\sin\varphi_{22} & -y_{23}\sin(\varphi_{23}+\delta_{23}) \\ -y_{31}\sin(\varphi_{31}+\delta_{31}) & -y_{32}\sin(\varphi_{32}+\delta_{32}) & y_{33}\sin\varphi_{33} \end{Vmatrix}\right.$$

$$\left.\begin{Vmatrix} x_{d1} - x_{q1} & 0 & 0 \\ 0 & x_{d2} - x_{q2} & 0 \\ 0 & 0 & x_{d3} - x_{q3} \end{Vmatrix} + \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix}\right\} \begin{Vmatrix} I_{d1} \\ I_{d2} \\ I_{d3} \end{Vmatrix} = 0 \qquad (4.22)$$

Ecuația matricială (4.22) are soluție nebanală, numai dacă este satisfăcută condiția ca determinantul ei caracteristic să fie egal cu zero. Adică:

$$\begin{Vmatrix} y_{11}\sin\varphi_{11} & -y_{12}\sin(\varphi_{12}+\delta_{12}) & -y_{13}\sin(\varphi_{13}+\delta_{13}) \\ -y_{21}\sin(\varphi_{21}+\delta_{21}) & y_{22}\sin\varphi_{22} & -y_{23}\sin(\varphi_{23}+\delta_{23}) \\ -y_{31}\sin(\varphi_{31}+\delta_{31}) & -y_{32}\sin(\varphi_{32}+\delta_{32}) & y_{33}\sin\varphi_{33} \end{Vmatrix}$$

$$\begin{Vmatrix} x_{d1} - x_{q1} & 0 & 0 \\ 0 & x_{d2} - x_{q2} & 0 \\ 0 & 0 & x_{d3} - x_{q3} \end{Vmatrix} + \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix} = 0 \qquad (4.23)$$

Scanned with OKEN Scanner

Relația (4.23) determină domeniul autoexcitării sincrone pentru oricare dintre parametrii variabili. De obicei, asemenea parametrii se adoptă x_C și R.

Admitanțele proprii și mutuale y_{11}, y_{22}, y_{33}, y_{12}, y_{13}, y_{23} pot să fie determinate conform schemei reprezentate prin reactanțele inductive x_{q1}, y_{q2}, x_{q3}. În acest caz ecuația (4.23) corespunde identic egalării cu zero a termenului liber al ecuației caracteristice obținută cu schema pentru trei mașini conform ecuației Park-Gorev.

Analizînd schema reprezentată în fig. 4.8, *b* se observă că centrala depărtată $G-1$ este legată cu două sisteme locale printr-o linie de transport echipată cu instalații de compensare capacitivă longitudinală. Fiecare din aceste sisteme reprezintă o mașină sincronă echivalentă G-2 și G-3. Determinantul caracteristic (4.23) al întregului sistem poate fi reprezentat după dezvoltarea lui, în felul următor:

$$Ax_C^2 + Bx_C + AR^2 + D = 0 \qquad (4.23\ a)$$

unde:

$$A = x_{d2}x_{q2} + x_{d3}x_{q3} + (x_{d2}x_{d3} + x_{q2}x_{q3}) \sin^2 (\delta_2 - \delta_3) + \\ + (x_{d2}x_{q3} + x_{d3}x_{q2}) \cos^2 (\delta_2 - \delta_3);$$

$$B = -[A(x_{d1} + x_{q1}) + x_{d2}x_{d3}(x_{d2} + x_{q3}) + x_{q2}x_{q3}(x_{d2} + \\ + x_{d3})];$$

$$D = Ax_{d1}x_{q1} + x_{d2}x_{d3}x_{q2}x_{q3} + x_{d2}x_{d3}x_{q2}(x_{d1} \sin^2 \delta_3 + \\ + x_{q1} \cos^2 \delta_3) + x_{d2}x_{q2}x_{q3}(x_{q1} \sin^2 \delta_3 + x_{d1} \cos^2 \delta_3) + \\ + x_{d2}x_{d3}x_{q3}(x_{d1} \sin^2 \delta_2 + x_{q1} \cos^2 \delta_2) + \\ + x_{d3}x_{q2}x_{q3}(x_{d1} \cos^2 \delta_2 + x_{q1} \sin^2 \delta_2).$$

Pentru deducerea ecuației (4.23 a) generatoarele, G-1, G-2, G-3, au fost reprezentate prin reactanțele sincrone x_{q1}, x_{q2} și x_{q3} de pe axa transversală (reactanța x a fost introdusă în reactanța de scăpări a generatorului $G-1$); admitanțele

proprii și mutuale y_{11}, y_{12}, y_{13}, y_{22}, y_{23} y_{33}, au fost calculate în conformitate cu schema sistemului (fig. 4.8, *c*). Ecuația (4.23 a) determină zona autoexcitării sincrone a generatoarelor unei centrale depărtate în coordonatele R și x_C, dacă se cunosc regimul și toți ceilalți parametri ai sistemului. Frontiera zonei de autoexcitare sincronă reprezintă un semicerc. Centrul semicercului este situat pe axa ordonatelor x_C (deoarece coeficientul termenului ce conține pe R la gradul întîi este egal cu zero) la distanța de la originea axelor de coordonate egală cu $\frac{B}{2A}$. Raza cercului se determină cu relația

$$\sqrt{\frac{B^2 - 4AD}{4A^2}}.$$

Pentru a nu face calcule inutile este suficient să se găsească din ecuația (4.23 a) două valori x_C la $R = 0$, care determină punctele de intersecție ale cercului cu axa x_C, iar diferența lor determină diametrul cercului care limitează zona *I* de autoexcitare sincronă.

Pe frontiera zonei *II* de autoexcitare, se stabilește regimul cuasisincron cu alunecare mică a cîmpului statorului față de rotor. La apariția alunecării putem considera ca supraconductoare fie una sau două înfășurări de excitație, fie înfășurările de excitație ale tuturor mașinilor.

Numărul circuitelor supraconductoare se mărește cu creșterea alunecării. În realitate, totuși, nu există circuite supraconductoare. Efectul de supraconductibilitate apare prin aceea că o parte din amperspirele de reacție ale statorului este compensată de curentul liber din înfășurarea de excitație în timpul proceselor tranzitorii, care se amortizează cu constanta de timp a circuitului dat de excitație. Aceasta corespunde apariției în schema electrică a unei t.e.m. oarecare suplimentară $I_d(x'_d - x_d)$, care compensează o parte din reactanța mașinii sincrone. Dacă se consideră ca supraconductoare înfășurările de excitație ale tuturor celor trei mașini, atunci prin aceasta se determină o parte a domeniului *II* de autoexcitare pornind de la balanța puterilor de pe frontiera sa.

Scanned with OKEN Scanner

Condiția de determinare a frontierei de autoexcitare *II* cînd înfășurările de excitație ale tuturor mașinilor sistemului sînt supraconductoare (fig. 4.8) este:

$$\left\|\begin{matrix} y_{11}\sin\varphi_{11} & -y_{12}\sin(\varphi_{12}+\delta_{12}) & -y_{13}\sin(\varphi_{13}+\delta_{13}) \\ -y_{21}\sin(\varphi_{21}-\delta_{21}) & y_{22}\sin\varphi_{22} & -y_{23}\sin(\varphi_{23}+\delta_{23}) \\ -y_{31}\sin(\varphi_{31}+\delta_{31}) & -y_{32}\sin(\varphi_{23}+\delta_{32}) & y_{33}\sin\varphi_{33} \end{matrix}\right\|$$

$$\left\|\begin{matrix} x'_{d1}-x_{q1} & 0 & 0 \\ 0 & x'_{d2}-x_{q2} & 0 \\ 0 & 0 & x'_{d3}-x_{q3} \end{matrix}\right\| + \left\|\begin{matrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{matrix}\right\|\Bigg\| = 0 \quad (4.24)$$

În scrierea determinantului (4.24) se reflectă considerarea efectului de supraconductibilitate a înfășurărilor de excitație ale mașinilor. Reactanțele sincrone x_d[ecuația (4.23)] sînt schimbate în reactanțe tranzitorii x'_d ale mașinilor, iar în rest ecuația (4.24) este aceeași ca și (4.23). Dezvoltînd determinantul (4.24) obținem egalitatea:

$$[(x'_{d1}-x_C)(x_{q1}-x_C)+R^2][x'_{d2}x_{q2}+x'_{d3}x_{q3}+(x'_{d2}x'_{d3}+$$
$$+x_{q2}x_{q3})\sin^2(\delta_2-\delta_3)+(x'_{d2}x_{q3}+x'_{d3}x_{q2})\cos^2(\delta_2-\delta_3)]+$$
$$+x'_{d2}x'_{d3}x_{q2}x_{q3}+(x'_{d1}-x_C)[x'_{d2}x'_{d3}x_{q2}\sin^2\delta_3+$$
$$+x'_{d2}x_{q2}x_{q3}\cos^2\delta_3+x'_{d2}x'_{d3}x_{q3}\sin^2\delta_2+x'_{d3}x_{q2}x_{q3}\cos^2\delta_2]+$$
$$+(x_{q1}-x_C)[x'_{d2}x'_{d3}x_{q2}\cos^2\delta_3+x'_{d2}x_{q2}x_{q3}\sin^2\delta_3+$$
$$+x_{d2}x'_{d3}x_{q3}\cos^2\delta_2+x'_{d3}x_{q2}x_{q3}\sin^2\delta_2]=0, \quad (4.24a)$$

care determină o parte din zona *II* de autoexcitare asincronă în coordonatele R și x_C. Frontiera acestei părți a zonei *II* reprezintă un semicerc pentru construirea căruia este suficientă găsirea a două valori x_C la $R=0$.

Determinantul (4.24), scris sub formă dezvoltată, corespunde egalării cu zero a lui a'_8 adică egalării cu zero a coeficientului de grad cel mai mare (p^3) al ecuației caracteristice fără considerarea proceselor tranzitorii din stator, care este dat în anexa 5. Însă această ecuație nu redă între zona *II* de autoexcitare, deoarece este posibil un întreg șir de com-

binații de circuite supraconductoare ale înfășurărilor de excitație a mașinilor. Limita zonei *II* de autoexcitare asincronă este determinată de bilanțul puterilor în toate combinațiile posibile dintre circuitele supraconductoare ale rotoarelor în ansamblu. Trebuie reținut că înfășurarea de excitație cu constanta de timp mare devine cea dintîi supraconductoare și procesele tranzitorii din ea se atenuează mai încet. De aceea, trebuie considerată influența constantelor de timp ale circuitelor rotoarelor asupra condiției de autoexcitare. Pentru sistemul cu trei mașini se mai pot scrie încă două ecuații pentru determinarea frontierei zonei *II* de autoexcitare prin considerarea constantelor de timp ale circuitelor rotorice :

$$T_{d10}\left\|\begin{matrix} y_{11}\sin\varphi_{11} & -y_{12}\sin(\varphi_{12}+\delta_{12}) & -y_{13}\sin(\varphi_{13}+\delta_{13}) \\ -y_{21}\sin(\varphi_{21}+\delta_{21}) & y_{22}\sin\varphi_{22} & -y_{23}\sin(\varphi_{23}+\delta_{23}) \\ -y_{31}\sin(\varphi_{31}+\delta_{31}) & -y_{32}\sin(\varphi_{32}+\delta_{32}) & y_{33}\sin\varphi_{33} \end{matrix}\right\| \times$$

$$\left\|\begin{matrix} x'_{d1}-x_{q1} & 0 & 0 \\ 0 & x_{d2}-x_{q2} & 0 \\ 0 & 0 & x_{d3}-x_{q3} \end{matrix}\right\| + \left\|\begin{matrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{matrix}\right\| +$$

$$+\ T_{d20}\left\|\begin{matrix} y_{11}\sin\varphi_{11} & -y_{12}\sin(\varphi_{12}+\delta_{12}) & -y_{13}\sin(\varphi_{13}+\delta_{13}) \\ -y_{21}\sin(\varphi_{21}+\delta_{21}) & y_{22}\sin\varphi_{22} & y_{23}\sin(\varphi_{23}+\delta_{23}) \\ -y_{31}\sin(\varphi_{31}+\delta_{31}) & -y_{32}\sin(\varphi_{32}+\delta_{32}) & y_{33}\sin\varphi_{33} \end{matrix}\right\| \times$$

$$\times \begin{Vmatrix} x_{d1} - x_{q1} & 0 & 0 \\ 0 & x'_{d2} - x_{q2} & 0 \\ 0 & 0 & x_{d3} - x_{q3} \end{Vmatrix} + \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix} +$$

$$+ T_{d30} \begin{Vmatrix} y_{11} \sin \varphi_{11} & - y_{12} \sin (\varphi_{12} + \delta_{12}) & - y_{13} \sin (\varphi_{13} + \delta_{13}) \\ - y_{21} \sin (\varphi_{21} + \delta_{21}) & y_{22} \sin \varphi_{22} & - y_{23} \sin (\varphi_{23} + \delta_{23}) \\ - y_{31} \sin (\varphi_{31} + \delta_{31}) & - y_{32} \sin(\varphi_{32} + \delta_{32}) & y_{33} \sin \varphi_{33} \end{Vmatrix} \times$$

$$\times \begin{Vmatrix} x_{d1} - x_{q1} & 0 & 0 \\ 0 & x_{d2} - x_{q2} & 0 \\ 0 & 0 & x'_{d3} - x_{q3} \end{Vmatrix} + \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix} = 0. \quad (4.25)$$

Ecuația (4.25) ține seama că supraconductoare pot fi succesiv înfășurările de excitație ale primei, a doua și a treia mașini. După ce dezvoltăm determinantul caracteristic (4.25) după regulile algebrei matriciale, obținem ecuația (4.25 *a*):

$$T_{d10}\{[(x'_{d1} - x_C)(x_{q1} - x_C) + R^2][x_{d2}x_{q2} + x_{d3}x_{q3} +$$
$$+ (x_{d2}x_{d3} + x_{q2}c_{q3}) \sin^2 (\delta_2 - \delta_3) + (x_{d2}x_{q3} +$$
$$+ x_{d3}x_{q2}) \cos^2 (\delta_2 - \delta_3)] + x_{d2}x_{d3}x_{q2}x_{q3} +$$
$$+ (x'_{d1} - x_C)[x_{d2}x_{d3}x_{q2} \sin^2 \delta_3 + x_{d2}x_{q2}x_{q3} \cos^2 \delta_3 +$$
$$+ x_{d2}x_{d3}x_{q3} \sin^2 \delta_2 + x_{d3}x_{q2}x_{q3} \cos^2 \delta_2] +$$
$$+ (x_{q1} - x_C)[x_{d2}x_{d3}x_{q2} \cos^2 \delta_3 + x_{d2}x_{q2}x_{q3} \sin^2 \delta_3 +$$
$$+ x_{d2}x_{d3}x_{q3} \cos^2 \delta_2 + x_{d3}x_{q2}x_{q3} \sin^2 \delta_2]\} +$$
$$+ T_{d20}\{[(x_{d1} - x_C)(x_{q1} - x_C) + R^2][x'_{d2}x_{q2} + x_{d3}x_{q3} +$$
$$+ (x'_{d2}x_{d3} + x_{q2}x_{q3}) \sin^2 (\delta_2 - \delta_3) + (x'_{d2}x_{q3} +$$

$$+ x_{d3}x_{q2}) \cos^2 (\delta_2 - \delta_3)] + x'_{d2}x_{d3}x_{q2}x_{q3} +$$

$$+ (x_{d1} - x_C)[x'_{d2}x_{d3}x_{q2} \sin^2 \delta_3 + x'_{d2}x_{q2}x_{q3} \cos^2 \delta_3 +$$

$$+ x'_{d2}x_{d3}x_{q3} \sin^2 \delta_2 + x_{d3}x_{q2}x_{q3} \cos^2 \delta_2] + (x_{q1} - x_C) \times$$

$$\times [x'_{d2}x_{d3}x_{q2} \cos^2 \delta_2 + x'_{d2}x_{q2}x_{q3} \sin^2 \delta_3 +$$

$$+ x'_{d2}x_{d3}x_{q3} \cos^2 \delta_2 + x_{d3}x_{q2}x_{q3} \sin^2 \delta_2]\} +$$

$$+ T_{d30}\{[(x_{d1} - x_C)(x_{q1} - x_C) + R^2][x_{d2}x_{q2} + x_{d3}x_{q3} +$$

$$+ (x_{d2}x'_{d3} + x_{q2}x_{q3}) \sin^2 (\delta_2 - \delta_3) + (x_{d2}x_{q3} +$$

$$+ x'_{d3}x_{q2}) \cos^2 (\delta_2 - \delta_3)] + x_{d2}x'_{d3}x_{q2}x_{q3} +$$

$$+ (x_{d1} - x_C)[x_{d2}x'_{d3}x_{q2} \sin^2 \delta_3 + x_{d2}x_{q2}x_{q3} \cos^2 \delta_3 +$$

$$+ x_{d2}x'_{d3}x_{q3} \sin^2 \delta_2 + x'_{d3}x_{q2}x_{q3} \cos^2 \delta_2] + (x_{q1} - x_C) \times$$

$$\times [x_{d2}x'_{d3}x_{q2} \cos^2 \delta_3 + x_{d2}x_{q2}x_{q3} \sin^2 \delta_3 +$$

$$+ x_{d2}x'_{d3}x_{q3} \cos^2\delta_2 + x'_{d3}x_{q2}x_{q3} \sin^2 \delta_2]\} = 0. \quad (4.25\ a)$$

Ecuația (4.25 a) ține seama de toate combinațiile posibile dintre circuitele semiconductoare a două mașini :

$$T_{d10}T_{d20}\left\|\begin{matrix} y_{11} \sin \varphi_{11} & -y_{12} \sin (\varphi_{12} + \delta_{12}) & -y_{13} \sin (\varphi_{13} + \delta_{13}) \\ -y_{21} \sin (\varphi_{21} + \delta_{21}) & y_{22} \sin \varphi_{22} & -y_{23} \sin (\varphi_{23} + \delta_{23}) \\ -y_{31} \sin (\varphi_{31} + \delta_{31}) & -y_{32} \sin (\varphi_{12} + \delta_{12}) & y_{33} \sin \varphi_{33} \end{matrix}\right\| \times$$

$$\times \left\|\begin{matrix} x'_{d1} - x_{q1} & 0 & 0 \\ 0 & x'_{d2} - x_{q2} & 0 \\ 0 & 0 & x_{d3} - x_{q3} \end{matrix}\right\| + \left\|\begin{matrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{matrix}\right\| +$$

$$+ T_{d10} T_{d30} \left\| \begin{matrix} y_{11} \sin \varphi_{11} & -y_{12} \sin (\varphi_{12} + \delta_{12}) & -y_{13} \sin (\varphi_{13} + \delta_{13}) \\ -y_{21} \sin (\varphi_{21} + \delta_{21}) & y_{22} \sin \varphi_{22} & -y_{23} \sin (\varphi_{23} + \delta_{23}) \\ -y_{31} \sin (\varphi_{31} + \delta_{31}) & -y_{32} \sin (\varphi_{12} + \delta_{12}) & y_{33} \sin \varphi_{33} \end{matrix} \right\| \times$$

$$\times \left\| \begin{matrix} x'_{d1} - x_{q1} & 0 & 0 \\ 0 & x_{d2} - x_{q2} & 0 \\ 0 & 0 & x'_{d3} - x_{q3} \end{matrix} \right\| + \left\| \begin{matrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{matrix} \right\| +$$

$$+ T_{d20} T_{d30} \left\| \begin{matrix} y_{11} \sin \varphi_{11} & -y_{12} \sin (\varphi_{12} + \delta_{12}) & -y_{13} \sin (\varphi_{13} + \delta_{13}) \\ -y_{21} \sin (\varphi_{21} + \delta_{21}) & y_{22} \sin \varphi_{22} & -y_{23} \sin (\varphi_{23} + \delta_{23}) \\ -y_{31} \sin (\varphi_{31} + \delta_{31}) & -y_{32} \sin (\varphi_{12} + \delta_{12}) & y_{33} \sin \varphi_{33} \end{matrix} \right\| \times$$

$$\times \left\| \begin{matrix} x_{d1} - x_{q1} & 0 & 0 \\ 0 & x'_{d2} - x_{q2} & 0 \\ 0 & 0 & x'_{d3} - x_{q3} \end{matrix} \right\| + \left\| \begin{matrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{matrix} \right\| = 0 \quad (4.26)$$

Dezvoltînd determinantul caracteristic (4.26) după regulile algebrei matriciale, obținem ecuația (4.26a):

$$T_{d10} T_{d20} \{ [(x'_{d1} - x_C)(x_{q1} - x_C) + R^2][x'_{d2} x_{q2} + x_{d3} x_{q3} + (x'_{d2} x_{d3} + x_{q2} x_{q3}) \sin^2 (\delta_2 - \delta_3) + (x'_{d2} x_{q3} + x_{d3} x_{q2}) \cos^2 (\delta_2 - \delta_3)] + x'_{d2} x_{d3} x_{q2} x_{q3} + (x'_{d1} - x_C)[x'_{d2} x_{d3} x_{q2} \sin^2 \delta_3 + x'_{d2} x_{q2} x_{q3} \cos^2 \delta_3 + x'_{d2} x_{d3} x_{q3} \sin^2 \delta_2 + x_{d3} x_{q2} x_{q3} \cos^2 \delta_2] + (x_{q1} - x_C) \times$$

$$\times [x'_{d2}x_{d3}x_{q2}\cos^2\delta_3 + x'_{d2}x_{q2}x_{q3}\sin^2\delta_3 + x'_{d2}x_{d3}x_{q3}\cos^2\delta_2 +$$
$$+ x_{d3}x_{q2}x_{q3}\sin^2\delta_2]\} +$$
$$+ T_{d10}T_{d30}\{[(x'_{d1} - x_C)(x_{q1} - x_C) + R^2][x_{d2}x_{q2} + x'_{d3}x_{q3} +$$
$$+ (x_{d2}x'_{d3} + x_{q2}x_{q3})\sin^2(\delta_2 - \delta_3) + (x_{d2}x_{q3} +$$
$$+ x'_{d3}x_{q2})\cos^2(\delta_2 - \delta_3)] + x_{d2}x'_{d3}x_{q2}x_{q3} + (x'_{d1} -$$
$$- x_C)[x_{d2}x'_{d3}x_{q2}\sin^2\delta_3 + x_{d2}x_{q2}x_{q3}\cos^2\delta_3 +$$
$$+ x_{d2}x'_{d3}x_{q3}\sin^2\delta_2 + x'_{d3}x_{q2}x_{q3}\cos^2\delta_2] + (x_{q1} - x_C) \times$$
$$\times [x_{d2}x'_{d3}x_{q2}\cos^2\delta_3 + x_{d2}x_{q2}x_{q3}\sin^2\delta_3 +$$
$$+ x_{d2}x'_{d3}x_{q3}\cos^2\delta_2 + x'_{d3}x_{q2}x_{q3}\sin^2\delta_2]\} +$$
$$+ T_{d20}T_{d30}\{[(x_{d1} - x_C)(x_{q1} - x_C) + R^2][x'_{d2}x_{q2} + x'_{d3}x_{q3} +$$
$$+ (x'_{d2}x'_{d3} + x_{q2}x_{q3})\sin^2(\delta_2 - \delta_3) + (x'_{d2}x_{q3} +$$
$$+ x'_{d3}x_{q2})\cos^2(\delta_2 - \delta_3) + x'_{d2}x'_{d3}x_{q2}x_{q3} + (x_{d1} -$$
$$- x_C)[x'_{d2}x'_{d3}x_{q2}\sin^2\delta_3 + x'_{d2}x_{q2}x_{q3}\cos^2\delta_3 + x'_{d2}x'_{d3}x_{q3}\sin^2\delta_2 +$$
$$+ x'_{d3}x_{q2}x_{q3}\cos^2\delta_2] + (x_{q1} - x_C)[x'_{d2}x'_{d3}x_{q2}\cos^2\delta_3 +$$
$$+ x'_{d2}x_{q2}x_{q3}\sin^2\delta_3 + x'_{d2}x'_{d3}x_{q3}\cos^2\delta_2 +$$
$$+ x'_{d3}x_{q2}x_{q3}\sin^2\delta_2]\} = 0. \qquad (4.26\text{ a})$$

Determinantul caracteristic (4.26) a fost scris pentru toate combinațiile posibile ale celor două circuite supraconductoare ale rotoarelor celor trei mașini. Acest lucru se reflectă în scrierea determinantului caracteristic, unde la mașinile cu înfășurări supraconductoare reactanța x_d este schimbată cu x'_d.

Ecuația (4.26a) reprezintă determinantul caracteristic (4.26) dezvoltat după regulile algebrei matriciale.

Se poate vedea că ecuația (4.25 a) corespunde egalării cu zero a coeficientului a'_9, iar ecuația (4.26 a) — egalării cu zero a coeficientului a'_{10} din ecuația caracteristică a sistemului, dedusă în anexa 5. De aci rezultă că determinanții caracteristici (4.25)—(4.26) dau aceleași zone *I* și *II* ale autoexcitării, care pot fi obținute prin egalarea cu zero a fie-

cărui coeficient al ecuației caracteristice a sistemului, cînd nu se consideră procesele tranzitorii din stator (fig. 4.9).

Așadar, fără a deduce ecuația caracteristică generală a sistemului putem constitui zonele *I* și *II* de autoexcitare.

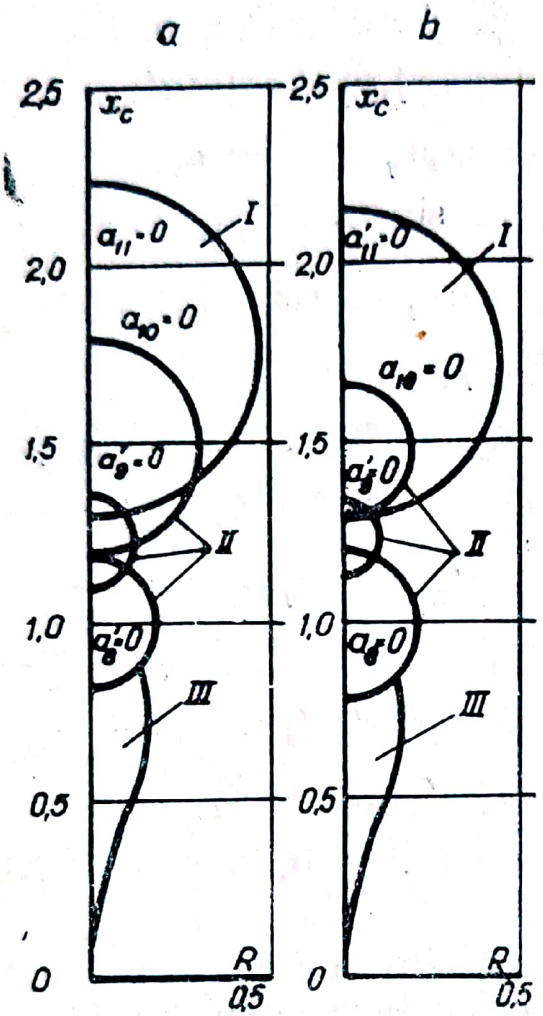


Fig. 4.9. Zonele autoexcitării determinate prin metoda simplificată, în sistemul cu trei centrale în funcție de regim:

a — $\delta_2 = 0, \delta_3 = 90°; \delta_1 = 0°$; b — $\delta_1 = 0$; $\delta_2 = 45°; \delta_3 = 45°$.

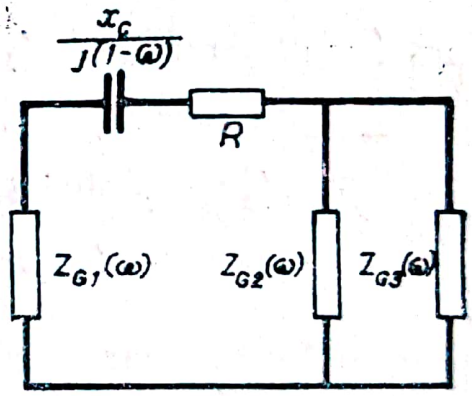


Fig. 4.10. Schema echivalentă cu elemente statice pentru determinarea zonei *III* a autoexcitării asincrone în sistemul reprezentat în fig. 4.8, *b*.

Zona *III* de autoexcitare asincronă în sistemul cu trei centrale, reprezentată în fig. 4.9 s-a determinat din analiza condițiilor de rezonanță în schema statică (fig. 4.10). Frontierei acestei zone îi corespund ecuațiile:

$$R = -\operatorname{Re}\left[Z_{G1}(\omega) + \frac{Z_{G2}(\omega)\, Z_{G3}(\omega)}{Z_{G2}(\omega) + Z_{G3}(\omega)}\right];$$

$$x_C = (1 - \omega)\,\mathrm{Im}\left[Z_{G1}(\omega) + \frac{Z_{G2}(\omega)Z_{G3}(\omega)}{Z_{G2}(\omega) + Z_{G3}(\omega)}\right].$$

După construirea zonelor *II* și *III*, se unesc prin linie continuă frontierele lor.

Deducerea ecuațiilor pentru determinarea domeniilor de autoexcitare sincronă *I* și asincronă *II* pentru schema cu două mașini (fig. 4.2) se face cu relațiile:

$$\left\|\begin{matrix} y_{11}\sin\varphi_{11} & -y_{12}\sin(\varphi_{12}+\delta_{12}) \\ -y_{21}\sin(\varphi_{21}+\delta_{21}) & y_{22}\sin\varphi_{11} \end{matrix}\right\| \times$$

$$\times \left\|\begin{matrix} x_{d1}-x_{q1} & 0 \\ 0 & x_{d2}-x_{q2} \end{matrix}\right\| + \left\|\begin{matrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{matrix}\right\| = 0; \qquad (4.27)$$

$$T_{d01}\left\|\begin{matrix} y_{11}\sin\varphi_{11} & -y_{12}\sin(\varphi_{12}+\delta_{12}) \\ -y_{21}\sin(\delta_{21}+\delta_{21}) & y_{22}\sin\varphi_{22} \end{matrix}\right\| \times$$

$$\times \left\|\begin{matrix} x'_{d1}-x_{q1} & 0 \\ 0 & x_{d2}-x_{q2} \end{matrix}\right\| + \left\|\begin{matrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{matrix}\right\| +$$

$$+ T_{d02}\left\|\begin{matrix} y_{11}\sin\varphi_{11} & -y_{12}\sin(\varphi_{12}+\delta_{21}) \\ -y_{21}\sin(\varphi_{21}+\delta_{21}) & y_{22}\sin\varphi_{22} \end{matrix}\right\| \times$$

$$\times \left\|\begin{matrix} x_{d1}-x_{q1} & 0 \\ 0 & x'_{d2}-x_{q2} \end{matrix}\right\| + \left\|\begin{matrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{matrix}\right\| = 0; \qquad (4.28)$$

$$\left\|\begin{matrix} y_{11}\sin\varphi_{11} & -y_{12}\sin(\varphi_{12}+\delta_{12}) \\ -y_{21}\sin(\varphi_{21}-\delta_{21}) & y_{22}\sin\varphi_{22} \end{matrix}\right\| \times$$

$$\times \left\|\begin{matrix} x'_{d1}-x_{q1} & 0 \\ 0 & x'_{d2}-x_{q2} \end{matrix}\right\| + \left\|\begin{matrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{matrix}\right\| = 0. \qquad (4.29)$$

Ecuația (4.27) s-a dedus la fel ca și ecuația (4.23). În ea, ambele mașini sincrone sînt reprezentate prin reactanța x_d, ceea ce corespunde cazului cînd înfășurările de excitație ale ambelor mașini sînt deschise. Această ecuație dă zona *I* a autoexcitării sincrone.

Expresiile (4.28) și (4.29) determină frontiera zonei *II* a autoexcitării asincrone. Prima dintre ele corespunde ipo-

Scanned with OKEN Scanner

tezei că înfăşurările de excitaţie la fiecare dintre maşini, se consideră în calcule succesiv supraconductoare. A doua corespunde condiţiei cînd înfăşurările rotoarelor ambelor maşini se consideră simultan supraconductoare. Pentru sistemul cu două maşini nu se întîlnesc ecuaţii de forma (4.27).

Valorile admitanţelor proprii şi mutuale, cum şi argumentele lor se determină pentru cazul schemei reprezentată în fig. 4.2 :

$$y_{11} = y_{12} = y_{21} = y_{22} = \frac{1}{\sqrt{(x_{q1} + x_{q2} - x_C)^2 + R^2}};$$

$$\varphi_{11} = \varphi_{12} = \varphi_{21} = \varphi_{22} = \operatorname{arc\,tg} \frac{x_{q1} + x_{q2} - x_C}{R}.$$

Introducînd în ecuaţia (4.27) valorile admitanţelor proprii şi mutuale şi dezvoltînd determinantul, obţinem expresia identic egală cu termenul liber al ecuaţiei caracteristice (4.15) care determină zona *I* de autoexcitare sincronă.

În mod analog, se poate obţine condiţia pentru care (4.28) şi (4.29) corespund celorlalţi doi coeficienţi ai ecuaţiei (4.15).

Deci, fără să se scrie ecuaţia caracteristică a sistemului, se pot construi zonele *I* şi *II* ale autoexcitării.

Metoda de verificare a sistemului la autopendulare, expusă anterior, dă posibilitatea să fie luat în considerare orice număr de maşini, nu necesită mult timp pentru calcul şi permite obţinerea unei precizii dorite.

Concluziile referitoare la determinarea domeniilor de autoexcitare a maşinilor care funcţionează în sisteme electrice complexe sînt următoarele :

— Domeniile autoexcitării maşinilor în sistemele complexe au o întindere mai mare decît în schema simplă şi, de aceea, la construirea lor este necesar să fie luate în considerare toate maşinile ce funcţionează în sistem.

— Construirea domeniilor de autoexcitare sincronă *I* şi asincronă *II* se poate face simplificat fără a ţine seama de procesele tranzitorii din stator; totodată, se poate considera că maşinile nu au înfăşurări de amortizare. Determinarea domeniilor se face fără deducerea ecuaţiei caracteristice, cu ajutorul expresiilor de forma (4.23), (4.24) şi (4.26), ceea ce corespunde egalării cu zero, pe rînd, a tuturor coefi-

cienţilor ecuaţiei caracteristice, fără a ţine seama de procesele tranzitorii din circuitele statorice.

— Construirea simplificată a domeniului *III* de autoexcitare asincronă se reduce la schimbarea maşinii sincrone, pentru alunecări mari, cu maşina asincronă avînd caracteristicile de frecvenţă medii în axele *d* şi *q*. Apoi, sistemul dinamic se reduce la sistem static unde se analizează condiţiile de rezonanţă parametrice la diverse frecvenţe de oscilaţii libere.

Avantajul metodei simplificate propuse pentru determinarea autoexcitării în sistemele complexe reiese evident din simplitatea calculelor, reprezentarea lor fizică şi din posibilitatea determinării domeniilor de autoexcitare în sistemele de orice complexitate cu orice număr de maşini.

4.2. *Determinarea domeniilor de autoexcitare a maşinilor sincrone care funcţionează într-o reţea complexă a unui sistem de putere mare* [1])

Pentru determinarea, prin metodă exactă, a domeniilor autoexcitării maşinii conectată la un sistem puternic printr-o reţea complexă (fig. 4.11, *a*), trebuie să se deducă ecuaţia caracteristică a sistemului (gradul ecuaţiei depinde de felul reţelei) şi apoi să se analizeze această ecuaţie din punct de vedere al stabilităţii cu ajutorul uneia din metodele cunoscute. Totuşi, chiar pentru o reprezentare simplificată a reţelei complexe, aşa cum se arată în fig. 4.11, *b*, în care s-a ţinut seama de sarcina aplicată într-unul din puncte (reprezentată prin rezistenţa R_s şi reactanţa inductivă x_s) şi reactanţa inductivă x_2 (care ţine seama de linii, transformatoare şi alte elemente din circuitul receptor al sistemului), gradul ecuaţiei caracteristice va fi de ordinul nouă, dacă pe rotorul maşinii nu se găsesc circuite de amortizare şi de ordinul 11, în cazul cînd pe rotor există înfăşurări de amortizare de-a lungul axelor longitudinale şi transversale. Deducerea unei asemenea ecuaţii reprezintă o problemă dificilă, mai ales analiza ei în forma sa generală.

---

[1]) Este de remarcat că relaţiile obţinute în acest subcapitol reprezintă un caz particular al ecuaţiilor generale deduse în subcapitolul 4.1.

Scanned with OKEN Scanner

Pentru schema considerată, se pot găsi domeniile de autoexcitare a maşinilor şi fără să se deducă ecuaţia caracteristică. Eroarea făcută cu această ocazie este mică.

În regimul stabilizat al sistemului, curenţii pot fi exprimaţi prin ecuaţiile:

$$\dot{I}_1 = Y_{11}\dot{E}_Q - Y_{12}\dot{U};$$
$$\dot{I}_2 = -Y_{21}\dot{E}_Q - Y_{22}\dot{U}.$$

Legătura între curenţii de pe axa longitudinală, t.e.m. E_Q şi tensiunea U se scriu sub formă matricială

$$\left\| \begin{matrix} I_{d1} \\ I_{d2} \end{matrix} \right\| = \left\| \begin{matrix} y_{11} \sin \varphi_{11} & -y_{12} \sin (\varphi_{12} + \delta) \\ -y_{21} \sin (\varphi_{21} + \delta) & y_{22} \sin \varphi_{22} \end{matrix} \right\| \left\| \begin{matrix} E_Q \\ U \end{matrix} \right\|.$$

Pentru determinarea domeniilor autoexcitării, se analizează regimul oscilaţiilor libere din sistemul reprezentat în fig. 4.11, *b*. Acestui regim îi corespunde lipsa de perturbări exterioare, adică $E_d = U = 0$

$$\left\| \begin{matrix} E_Q \\ U \end{matrix} \right\| = - \left\| \begin{matrix} x_{d1} - x_{q1} & 0 \\ 0 & 0 \end{matrix} \right\| \left\| \begin{matrix} I_{d1} \\ I_{d2} \end{matrix} \right\|.$$

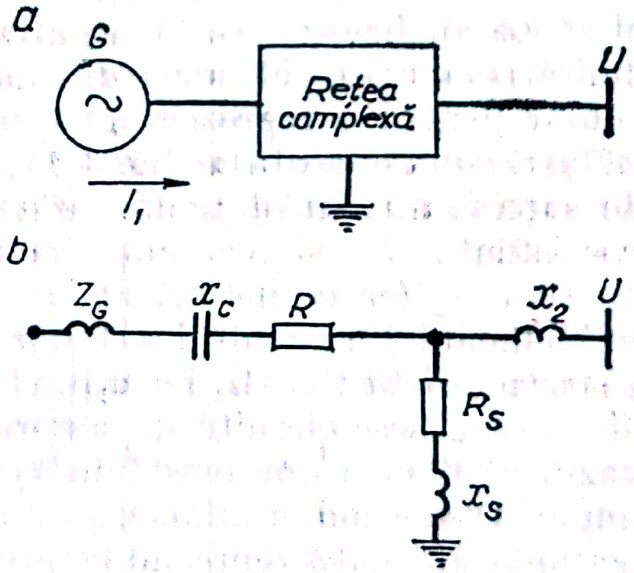


Fig. 4.11. Determinarea zonelor de autoexcitare a unei maşini sincrone, care funcţionează prin reţea complexă pe un sistem de putere mare:

a — schema sistemului; *b* — schema echivalentă a sistemului prin luarea în considerare a sarcinii sistemului.

Din ultimele expresii se poate obține determinantul caracteristic al sistemului

$$\left\| \begin{matrix} y_{11} \sin \varphi_{11} & -y_{12} \sin (\varphi_{12} + \delta) \\ -y_{21} \sin (\varphi_{21} + \delta) & y_{22} \sin \varphi_{22} \end{matrix} \right\| \times$$

$$\times \left\| \begin{matrix} x_{d1} - x_{q1} & 0 \\ 0 & 0 \end{matrix} \right\| + \left\| \begin{matrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{matrix} \right\| \Bigg\| = 0,$$

pe care dezvoltîndu-l găsim ecuația

$$1 + (x_{d1} - x_{q1}) y_{11} \sin \varphi_{11} = 0 \qquad (4.30)$$

Criteriul (4.30) dă posibilitatea să se determine zona autoexcitării sincrone pentru mașina care funcționează după schema reprezentată în fig. 4.11,*a*. Dacă se ia

$$Y_{11} = Y_{12} = Y_{22} = y \underline{|-\varphi}; \qquad y_{11} = \sqrt{R^2 + (x_q - x_C)^2},$$

$$\sin \varphi = \frac{x_q - x_C}{\sqrt{R^2 + (x_q - x_C)^2}},$$

ceea ce corespunde condiției de funcționare a mașinii prin reactanță, capacitate și rezistență exterioară la barele de tensiune constantă, se obține cunoscuta condiție pentru determinarea frontierei autoexcitării sincrone $(x_d - x_C)(x_q - x_C) + R^2 = 0$. La limita zonei *II* de autoexcitare se formează un regim cvasisincron cu alunecarea mică a cîmpului statorului față de rotor și, de aceea, se poate lua ca supraconductoare înfășurarea de excitație. În acest caz, după ce se schimbă reactanța x_d a mașinii cu x'_d, determinantul sistemului se scrie astfel

$$\left\| \begin{matrix} y_{11} \sin \varphi_{11} & -y_{12} \sin (\varphi_{12} + \delta) \\ -y_{21} \sin (\varphi_{21} + \delta) & y_{22} \sin \varphi_{22} \end{matrix} \right\| \times$$

$$\times \left\| \begin{matrix} x'_{d1} - x_{q1} & 0 \\ 0 & 0 \end{matrix} \right\| + \left\| \begin{matrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{matrix} \right\| \Bigg\| = 0.$$

Frontiera *II* a autoexcitării asincrone se va deduce deci cu ajutorul ecuației

$$1 + (x'_{d1} - x_{q1}) y_{11} \sin \varphi_{11} = 0 \qquad (4.31)$$

Scanned with OKEN Scanner

Criteriul (4.31) este identic cu criteriul aproximativ al zonei *II* de autoexcitare asincronă în cazul legăturii simple a mașinii cu sistemul. Zona *III* de autoexcitare asincronă poate fi construită dacă se schimbă mașina sincronă cu una asincronă. În acest fel, calculul domeniului de autoexcitare asincronă pentru schema reprezentată în fig. 4.11, *b* se reduce la determinarea condițiilor de rezonanță în schema statică reprezentată în fig.4.12, de unde se obțin ecuațiile corespunzătoare limitei zonei *III* de autoexcitare :

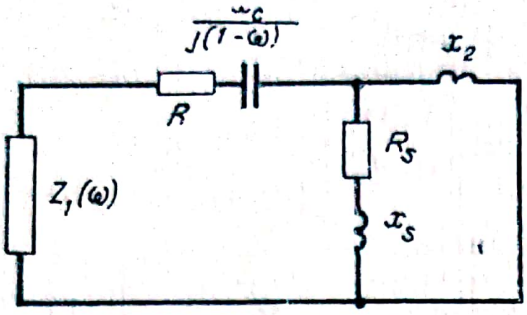


Fig. 4.12. Schema echivalentă cu elemente statice pentru determinarea zonei *III* de autoexcitare asincronă în sistemul reprezentat în fig. 4.11, *a*.

$$R = -\operatorname{Re}\left[Z_1(\omega) + \frac{(R_s + jx_s)jx_2}{R_s + j(x_s + x_2)}\right];$$

$$x_C = (1 - \omega)^2 \operatorname{Im}\left[Z_1(\omega) + \frac{(R_s + jx_s)jx_2}{R_s + j(x_s + x_2)}\right].$$

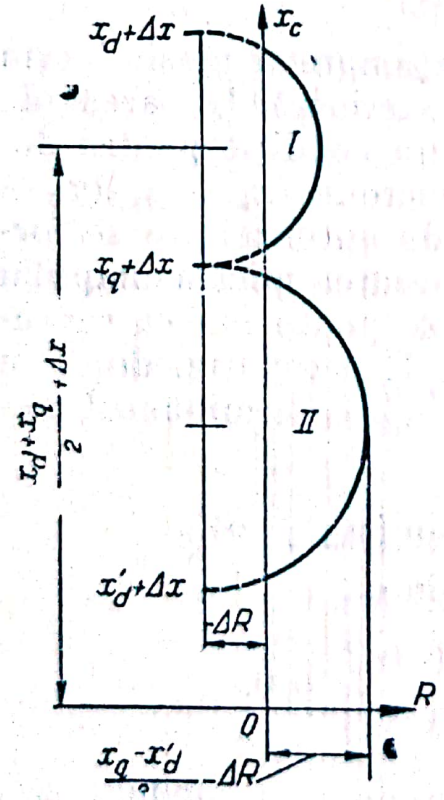


Fig. 4.13. Zonele *I* și *II* de autoexcitare în sistemul reprezentat prin schema echivalentă din fig. 4.11.

După construirea zonelor *II* și *III* de autoexcitare, frontierele lor se unesc printr-o curbă continuă.

Dezvoltînd expresia $y_{11} \sin \varphi_{11}$ pentru schema reprezentată în fig. 4.11, *b* găsim criteriile aproximative (4.30) și (4.31) pentru frontiera zonei de autoexcitare sincronă

$$(x_d + \Delta x - x_C)(x_q + \Delta x - x_C) + (R + \Delta R)^2 = 0, \quad (4.32)$$

și pentru frontiera zonei *II* de autoexcitare asincronă

$$(x'_d + \Delta x - x_C)(x_q - \Delta x - x_C) + (R + \Delta R^2) = 0 \quad (4.33)$$

unde :

$$\left.\begin{aligned} \Delta R &= \frac{R_s x_2^2}{R_s^2 + (x_2 + x_s)^2}; \\ \Delta x &= x_2 \frac{R_s^2 + x_s(x_s + x_2)}{R_s^2 + (x_2 + x_s)^2}. \end{aligned}\right\} \qquad (4.34)$$

Din ecuațiile (4.32) și (4.33) se vede că frontierele zonelor I și II de autoexcitare sînt reprezentate prin două porțiuni de cerc ale căror centre se găsesc respectiv la distanța $\frac{x_d + x_q}{2} + \Delta x$ și $\frac{x'_d + x_q}{2} + \Delta x$ față de axa absciselor și deplasate cu mărimea ΔR față de axa ordonatelor (fig. 4.13).

Raza cercului zonei autoexcitării sincrone este egală cu $\frac{x_d - x_q}{2}$, iar a autoexcitării asincrone cu $\frac{x_q - x'_d}{2}$.

Prin urmare, considerarea rețelei complexe deplasează domeniul autoexcitării inspre valorile mari ale lui x_C cu mărimea Δx; valoarea rezistenței, care limitează zonele I și II ale autoexcitării, se micșorează cu mărimea ΔR.

CAPITOLUL 5

Autopendularea în sistemul complex

5.1. *Probleme de cercetare*

În timpul studierii funcționării sistemelor electrice unificate se pune problema admisibilității unui regim oarecare al sistemului și felul cum se comportă sistemul în acest regim de funcționare. În particular trebuie analizată situația funcționării la sarcini mici cînd este posibilă apariția autopendulării generatoarelor aflate în componența sistemului complex. Dacă rezultă inadmisibilitatea regimului de funcționare la sarcini mici din cauza apariției autopendulării generatoarelor, trebuie să se ia măsuri care să elimine autopendularea și astfel să se mențină funcționarea stabilă a sistemului electric complex. În legătură cu aceasta trebuie să existe o metodă de verificare la autopendulare a unui sistem complex.

Cercetările analitice complete asupra autopendulării din sistemele electrice complicate se bazează pe studierea ecuațiilor Park-Gorev. Complicarea sistemului electric duce la creșterea numărului ecuațiilor diferențiale și la mărirea considerabilă a gradului ecuației caracteristice, lucruri care complică efectuarea analizei. De exemplu, la cercetarea autopendulării într-un sistem simplu „centrală-bare" trebuie analizată ecuația de gradul șapte dacă se ia în considerare existența înfășurărilor de amortizare pe generatoare. Gradul ecuației caracteristice este mai mare de 20 pentru schema cu trei mașini.

Deducerea ecuației caracteristice a sistemelor complexe prezintă dificultăți mari, mai ales la analiza stabilității lor. Problema studierii ecuației caracteristice de grade superioare în scopul determinării domeniilor de stabilitate se face folosind mașini electronice de calcul. Calea menționată de soluționare a problemei respective este admisibilă și în multe cazuri recomandabilă. Totuși în afara acestei metode de cercetare a autopendulării este bine să existe și metode mai simple de cercetare care să permită deducerea cu destulă precizie, din punct de vedere practic, a posibilității apariției autopendulării generatoarelor în sistemul complicat, fără folosirea unui aparat matematic prea laborios.

5.2. *Eliminarea autopendulării mașinilor sincrone care funcționează în paralel*

Determinarea posibilității apariției autopendulării generatoarelor dintr-o centrală electrică, cu n generatoare, conectată la sistem printr-o linie de transport ce are compensare capacitivă longitudinală se face utilizînd fig. 5.1.

Pentru deducerea condițiilor autopendulării (fig. 5.1) trebuie să se analizeze sistemul de ecuații compus din ecuațiile ce caracterizează :

— procesele tranzitorii electromagnetice (de-a

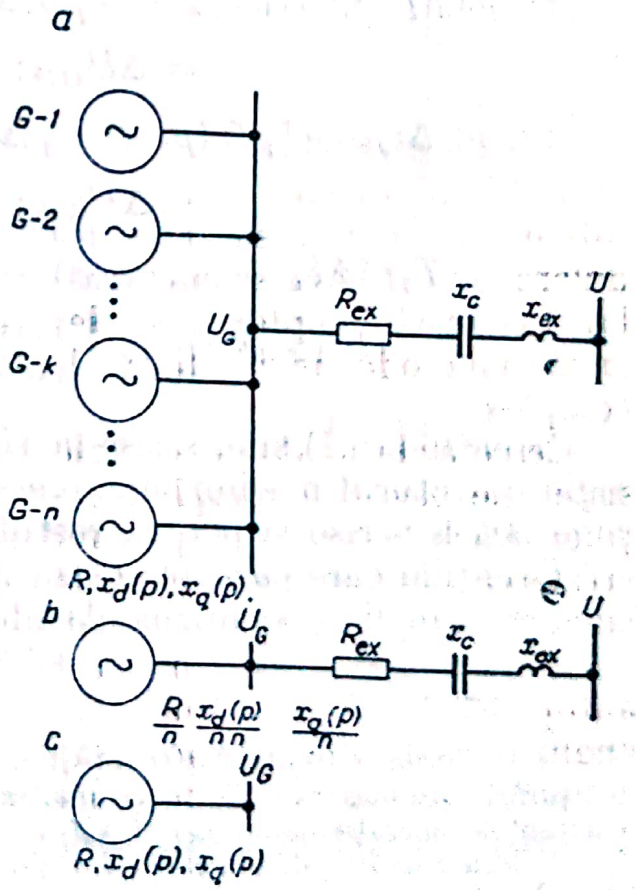


Fig. 5.1. Determinarea condițiilor de autopendulare a mașinilor sincrone:

— schema sistemului analizat; b — schema folosită la găsirea condițiilor de autoexcitare a tuturor generatoarelor în raport cu barele unui sistem puternic; c — schema pentru analiza autopendulării unui singur generator al centralei în raport cu tensiunea barelor centrale.

lungul axelor d și q) și electromecanice ale fiecărei mașin sînt astfel $3n$ ecuații;

— procesele tranzitorii electromagnetice din linie și din instalația de compensare capacitivă longitudinală (două ecuații corespunzătoare d, q);

— ecuațiile de bilanț în sistemul de axe d, q a curenților în nodul sistemului (barele stației).

Analiza comportării generatoarelor sistemului la sarcini mici se face în următoarele ipoteze:

— pe rotoarele mașinilor nu există înfășurări de amortizare; această condiție caracterizează probabilitatea cea mai mare de apariție a autopendulării [1]);

— generatoarele care funcționează în paralel cu aceiași parametri și sînt încărcate uniform; această condiție dă posibilitatea să se simplifice rezolvarea problemei fără să introducă erori esențiale.

Ecuațiile liniare care caracterizează procesele electromagnetice și electromecanice în mașina de ordinul k a centralei:

$$\left.\begin{aligned} &-[px_d(p)+R]\Delta i_{dk} - x_q(p)\Delta i_{qk} - \psi_{q0k}p\Delta\delta_k = \\ &\qquad = \Delta U_{Gdk}; \\ &x_d(p)\,\Delta i_{dk} - [px_q(p)+R]\,\Delta i_{qk} + \psi_{d0k}p\Delta\delta_k = \\ &\qquad = \Delta U_{Gqk}; \\ &T_J p^2\Delta\delta_k + [i_{q0k}x_d(p) - \psi_{q0k}]\Delta i_{dk} + \\ &\qquad + [\psi_{d0k} - i_{d0k}x_q(p)]\Delta i_{qk} = 0. \end{aligned}\right\} \quad (5.1)^{2)}$$

Ecuațiile (5.1) sînt scrise în sistemul de coordonate legat rigid cu rotorul mașinii sincrone de ordinul k. Ecuații analoge pot fi scrise și pentru restul de $n-1$ mașini.

Ecuațiile care caracterizează procesul tranzitoriu electromagnetic în linie și în instalațiile de compensare longitudi-

---

[1]) Ecuațiile obținute pot fi totuși extinse și la cazul cînd mașinile au înfășurări de amortizare, deoarece analiza se face în formă generală folosind reactanțele operaționale $x_d(p)$ și $x_q(p)$.

[2]) Ecuațiile inițiale din care s-a obținut sistemul (5.1) se dau în anexa 6.

nală sînt obținute din expresia căderii de tensiune în linia de transport care pentru faza a are expresia

$$U_{Ga} - U_a = x_C \int i_a dt + R_{ex} i_a + x_{ex} \frac{di_a}{dt}. \qquad (5.2)$$

După transformarea relației (5.2) prin raportare la sistemul de coordonate d, q legat de rotorul mașinii de ordinul k și după liniarizare obținem :

$$\left.\begin{aligned} &-\Delta U_{Gd} + p\Delta U_{Gq} = -(R_{ex} + 2px_{ex})\Delta i_d + \\ &+ [x_C + R_{ex}p + (p^2 - 1)x_{ex}]\Delta i_q + [\Delta U_{Gd0}p + \\ &+ U\cos\delta_{0k} - R_{ex}i_{d0}p - x_{ex}i_{d0}p^2 - 2x_{ex}i_{q0}p]\,\Delta\delta_k; \\ &p\Delta U_{Gd} + \Delta U_{Gq} = [x_C + R_{ex}p + x_{ex}(p^2 - \\ &- 1)]\,\Delta i_d + (R_{ex} + 2px_{ex})\Delta i_q + [-\Delta U_{Gq0}p - \\ &- U\sin\delta_{0k} + R_{ex}i_{q0}p + x_{ex}i_{q0}p^2 - 2x_{ex}i_{d0}p]\,\Delta\delta_k, \end{aligned}\right\} \qquad (5.3)$$

unde:

$$-U\sin\delta_{0k} = U_{d0};\ U\cos\delta_{0k} = U_{q0},$$

iar U este tensiunea sistemului receptor.

În ecuațiile (5.2) intră valorile variațiilor de curent Δi_d și Δi_q a liniei care trebuie exprimată prin variațiile de curent ale fiecăruia din cele n generatoare.

Pentru aceasta se scriu ecuațiile curenților într-un nod :

$$\left.\begin{aligned} &i_{a1} + i_{a2} + \dots + i_{ak} + \dots + i_{an} = i_a; \\ &i_{b1} + i_{b2} + \dots + i_{bk} + \dots + i_{bn} = i_b; \\ &i_{c1} + i_{c2} + \dots + i_{ck} + \dots + i_{cn} = i_c. \end{aligned}\right\} \qquad (5.4)$$

Ecuațiile (5.4) trebuie transformate într-un alt sistem de coordonate și anume cel legat de rotorul mașinii sincrone de ordinul k. Acest lucru se poate face sub formă matricială,

Scanned with OKEN Scanner

folosind matrice de transformare. După transformare și liniarizare se obțin următoarele ecuații :

$$\left.\begin{aligned}
&\Delta i_{d1} + \Delta i_{d2} + \ldots + \Delta i_{dk} + \ldots \Delta i_{dn} + i_{q01}\Delta\delta_1 + \\
&\quad + i_{q02}\Delta\delta_2 + \ldots - (i_{q0} - i_{q0k})\Delta\delta_k + \\
&\quad + \ldots + i_{q0n}\,\Delta\delta_n = \Delta i_d; \\
&\Delta i_{q1} + \Delta i_{q2} + \ldots + \Delta i_{qk} + \ldots + \Delta i_{qn} - \\
&- i_{d01}\Delta\delta_1 - i_{d02}\Delta\delta_2 - \ldots + (i_{d0} - i_{d0k})\Delta\delta_k - \\
&\quad - \ldots - i_{d0n}\Delta\delta_n = \Delta i_q.
\end{aligned}\right\} \quad (5.5)$$

Ecuațiile (5.1), (5.3) și (5.4) caracterizează complet procesul tranzitoriu al sistemului analizat. În baza studierii lor se pot obține condițiile de autopendulare a generatoarelor.

După transformările corespunzătoare și după eliminarea din sistemul de ecuații a variabilelor ΔU_{Gd}; ΔU_{Gq}; Δi_d; Δi_q se pot scrie ecuațiile pentru mașina k :

$$\left.\begin{aligned}
&b\Delta i_{d1} + b\Delta i_{d2} + \ldots + a\Delta i_{dk} + \ldots + b\Delta i_{dn} + \\
&+ d\Delta i_{q1} + d\Delta i_{q2} + \ldots + c\Delta i_{qk} + \ldots + d\Delta i_{qn} + \\
&\quad + e\Delta\delta_1 + e\Delta\delta_2 + \ldots + m\Delta\delta_k + e\Delta\delta_n = 0; \\
&f\Delta i_{d1} + f\Delta i_{d2} + \ldots + l\Delta i_{dk} + \ldots + f\Delta i_{dn} + \\
&+ h\Delta i_{q1} + h\Delta i_{q2} + \ldots + g\Delta i_{qk} + \ldots + h\Delta i_{qn} + \\
&+ w\Delta\delta_1 + w\Delta\delta_2 + \ldots + s\Delta\delta_k + \ldots + w\Delta\delta_n = 0; \\
&\quad A\Delta i_{dk} + B\Delta i_{qk} + F\Delta\delta_k = 0.
\end{aligned}\right\} \quad (5.6)$$

Primele două ecuații ale sistemului (5.6) exprimă procesele electromagnetice ce au loc în mașina k și în linia de transport a energiei. Ultima ecuație descrie procesul tranzitoriu electromecanic al mașinii k. În mod analog se pot obține celelalte $3(n-1)$ ecuații Park-Gorev pentru celelalte $n-1$ mașini ale centralei.

Expresiile care permit determinarea coeficienților ecuațiilor (5.6) se dau în anexa 7.

Condiţiile de încărcare uniformă a tuturor maşinilor se exprimă prin relaţiile :

$$\delta_{01} = \delta_{02} = \dots \delta_{0k} = \delta_{0n};$$

$$\psi_{d0i} = \psi_{d0k} = U_{G0q} + \frac{R}{n} i_{q0} = E_{d0} + \frac{1}{n} x_d i_{d0} = \psi'_{d0};$$

$$\psi_{q0i} = \psi_{q0k} = \frac{1}{n} \psi_{q0};$$

$$i_{d0i} = i_{d0k} = \frac{1}{n} i_{d0};$$

$$i_{q0i} = i_{q0k} = \frac{1}{n} i_{q0}.$$

Limitele domeniului de autopendulare a generatoarelor pot fi găsite dacă se cercetează determinantul caracteristic al sistemului care se poate reprezenta în felul următor

$$D(p) = \left| \begin{array}{ccc|ccc|ccc|c} a & b & \dots & b & c & d & \dots & d & m & l & \dots & l & 1 \\ b & a & \dots & b & d & c & \dots & d & l & m & \dots & l & 2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ b & b & \dots & a & d & d & \dots & c & l & l & \dots & m & n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \\ e & f & \dots & f & g & h & \dots & h & s & w & \dots & w & \\ f & e & \dots & f & g & g & \dots & h & w & w & \dots & w & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \\ f & f & \dots & e & h & h & \dots & g & w & w & \dots & s & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \\ A & 0 & \dots & 0 & B & 0 & \dots & 0 & F & 0 & \dots & 0 & \\ 0 & A & \dots & 0 & 0 & B & \dots & 0 & 0 & F & \dots & 0 & \\ 0 & 0 & \dots & A & 0 & 0 & \dots & B & 0 & 0 & \dots & F & \end{array} \right| \quad \text{numărul maşinii} \qquad (5.7)$$

Analiza sub forma generală a determinantului (5.7), fără a utiliza maşini electrice de calcul, reprezintă o problemă imposibilă.

Cercetarea determinantului caracteristic poate fi mult uşurată dacă se fac o serie de transformări cu liniile şi coloanele sale. După aceasta se obţine determinantul sub forma simplificată

$$D(p) = \begin{vmatrix} H_1 & H_3 & H_3 \dots H_3 \\ 0 & H_2 & 0 \dots 0 \\ 0 & 0 & H_2 \dots 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 \quad H_2 \end{vmatrix}, \tag{5.8}$$

unde H_1, H_2, H_3, sînt minorii corespunzători.

Determinantul (5.8) poate fi dezvoltat în produs de factori bazîndu-ne pe cunoscuta teoremă a lui Laplace din algebra matricială

$$D(p) = H_1 H_2^{n-1} =$$

$$= \left\{ \begin{vmatrix} a + (n-1)b & c + (n-1)d & m + (n-1)l \\ e + (n-1)f & g + (n-1)h & s + (n-1)w \\ A & B & F \end{vmatrix} \right\} \times$$

$$\times \left\{ \begin{vmatrix} a - b & c - d & m - l \\ e - f & g - h & s - w \\ A & A & G \end{vmatrix} \right\}^{n-1} = 0. \tag{5.9}$$

Aşadar, determinantul caracteristic (5.7) reprezintă produsul a doi factori (5.9); condiţiile de stabilitate a sistemului se deduc dacă se analizează cele două ecuaţii:

$$H_1 = 0; \qquad H_2 = 0. \tag{5.10}$$

Oprindu-ne mai amănunţit la fiecare din condiţiile (5.10) se scrie prima sub formă matricială dezvoltată :

$$H_i = n \begin{vmatrix} 2p\left[\frac{x_d(p)}{n} + x_{ex}\right] + \left(\frac{R}{n} + R_{ex}\right) & 2p\left[\frac{x_q(p)}{n} + x_{ex}\right] + \left(\frac{R}{n} + R_{ex}\right) & E_{d0} + \left\{\left(\frac{x_d}{n} + x_{ex}\right) - \left[\frac{x_q(p)}{n} + x_{ex}\right]\right\} i_{d0} \\ p^2 - 1\left[\frac{x_d(p)}{n} + x_{ex}\right] + p\left(\frac{R}{n} + R_{ex}\right) + x_C & \left[E_{d0} + i_{d0}\left(\frac{x_d}{n} + x_{ex}\right)\right]p^2 + 2i_{q0}\left(\frac{x_q}{n} + x_{ex}\right) \times & \times p + \left(\frac{R}{n} + R_{ex}\right) i_{d0}\, p - U \cos \delta_0 \\ i_{q0}\left\{\left[\frac{x_d(p)}{n} + x_{ex}\right] + \left(\frac{x_q}{n} + x_{ex}\right)\right\} & i_{q0}\left(\frac{x_q}{n} + x_{ex}\right)p^2 - 2\left[E_{d0} + \left(\frac{x_d}{n} + x_{ex}\right) i_{d0}\right]p + & + \left(\frac{R}{n} + R_{ex}\right) i_{q0}\, p - U \sin \delta_0 \\ -(p^2 - 1)\left[\frac{x_q(p)}{n} + x_{ex}\right] - p\left(\frac{R}{n} + R_{ex}\right) - x_C & & nT_J p^2 \end{vmatrix} = 0 \tag{5.11}$$

Se poate arăta că determinantul (5.11) corespunde ecuaţiei caracteristice (3.1) a sistemului care determină condiţiile de stabilitate a unei singure maşini ce funcţionează printr-o linie de transport pe un sistem puternic.

Deosebirea constă în faptul că în ecuaţia caracteristică (3.1) intră parametrii unei singure maşini $x_d(p)$; $x_q(p)$; R, T_J,

iar în determinantul (5.11) — parametrii mașinii de ordinul n ce funcționează în paralel cu celelalte :

$$\frac{1}{n}x_d(p); \qquad \frac{1}{n}x_q(p); \qquad \frac{1}{n}R; \qquad nT_J.$$

Dacă se schimbă cele n mașini care funcționează în paralel cu una singură avînd parametri $\frac{1}{n}x_d(p)$; $\frac{1}{n}x_q(p)$; $\frac{1}{n}R$; nT_J, condițiile de stabilitate (5.11) vor fi aceleași ca și pentru funcționarea unei singure mașini pe un sistem a cărui tensiune egală cu U este neschimbată (fig. 5.1, *b*). Prin urmare una din condițiile de funcționare stabilă în paralel a generatoarelor la sarcini mici se reduce la verificarea lipsei de autopendulare a unui generator echivalent care funcționează pe sarcina sistemului. Metodele unei asemenea analize sînt arătate în capitolul 3.

A doua condiție (5.12) de funcționare stabilă (la sarcini mici) a n generatoare ce funcționează în paralel, ținînd seama de relațiile ce reflectă încărcarea uniformă a generatoarelor, poate fi obținută sub forma :

$$H_2 = (p^2+1)\begin{vmatrix} x_d(p) & -[x_q(p)+R] & \psi_{d0k}p + U_G\sin\delta_0 \\ px_d(p)+R & x_q(p) & \to\ \psi_{q0k}p + U_G\cos\delta_0 \\ i_{q0k}x_d(p) - \psi_{q0k} & \psi_{d0k} - i_{d0k}x_q(p) & T_Jp^2 \end{vmatrix} = 0. \qquad (5.12)$$

Comparînd determinantul caracteristic (5.12) cu sistemul de ecuații (3.1) se deduce că relația (5.12) reprezintă condiția ce corespunde determinării domeniilor de autopendulare cînd oricare din cele n mașini funcționează la barele de tensiune dată (fig. 5.1, *c*). Determinarea domeniilor de autopendulare a mașinii se poate face în acest caz tot cu metoda expusă în capitolul 3.

Cercetările efectuate au arătat că în sistemul analizat (fig. 5.1, *a*) este posibilă autopendularea atît a centralei în

ansamblu față de sistemul puternic, cît și a fiecăruia dintre mașinile centralei în raport cu toate celelate generatoare ce funcționează la barele comune ale centralei avînd tensiunea U_G.

Determinantul caracteristic (5.12) ține seama de posibilitatea mișcării relative între ele a mașinilor sincrone dintr-o centrală. În cazul cînd se dorește găsirea regimurilor unde este posibilă autopendularea între mașinile unei centrale pe seama pendulării asincrone a uneia dintre ele trebuie luată ca tensiune neschimbată tensiunea de pe barele centralei unde sînt conectate toate generatoarele. Totuși trebuie să se remarce că raportul $\frac{R}{x_q}$ în circuitele mașinilor sincrone are o valoare foarte mică și de aceea practic se exclude posibilitatea autopendulării între ele a generatoarelor.

Prin urmare, determinarea condițiilor de autopendulare a centralei electrice cu n generatoare ce funcționează în paralel se reduce practic la găsirea regimurilor unde este posibilă apariția instabilității periodice a unui singur generator echivalent care să reprezinte în ansamblu centrala; autopendularea acestui generator are loc în raport cu sistemul de putere mare pe barele căruia tensiunea se menține neschimbată. Parametrii generatorului echivalent al centralei depind de parametrii fiecărui generator și de numărul generatoarelor conectate.

Deoarece domeniile autopendulării se determină prin numărul generatoarelor conectate în paralel, iar unui număr mare de mașini conectate la bare îi corespunde cea mai largă zonă de instabilitate periodică, la determinarea condițiilor de apariție a autopendulării trebuie luată în considerare variația numărului de mașini sincrone ce funcționează în paralel, cum și schimburile posibile ale schemei centralei în diverse regimuri de exploatare.

Metoda verificării schemei obținute în acest caz s-a expus în capitolul 3. Ne vom opri asupra posibilității eliminării autopendulării în sistemul studiat folosind RAT (fig. 5.2).

Punînd astfel problema se pot analiza două cazuri și anume:

— pe fiecare mașină sincronă este montat un RAT ce reacționează la abaterea parametrului general, de exemplu a curentului liniei și a derivatelor sale;

Scanned with OKEN Scanner

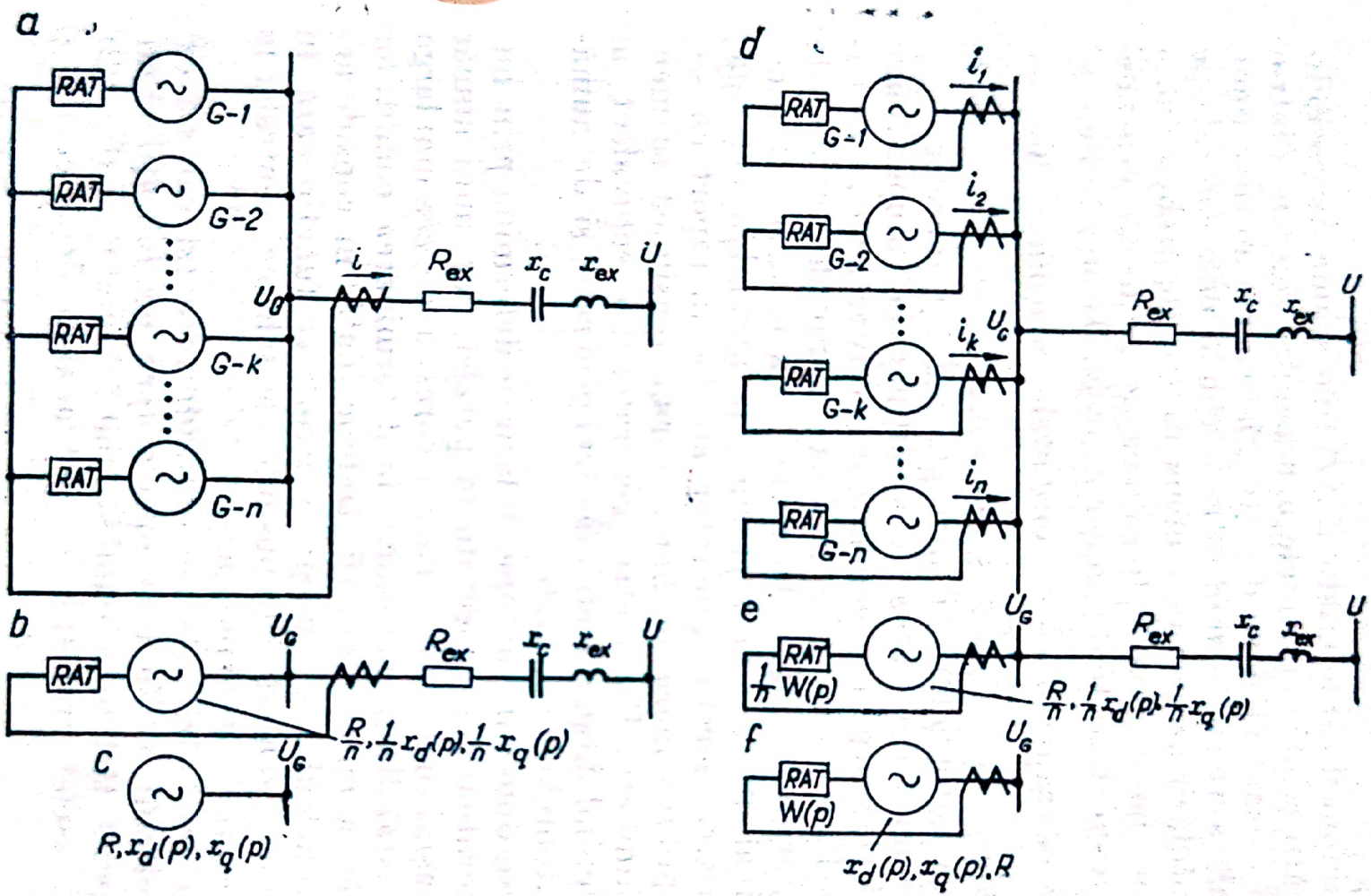


Fig. 5.2. Eliminarea autopendulării generatoarelor cu ajutorul reglării automate a excitației:

a — schema în cazul cînd generatoarele au RAT în funcție de parametrul global al centralei; *b* — schema pentru determinarea condițiilor de eliminare a autopendulării tuturor generatoarelor centralei în raport cu tensiunea *U* a barelor sistemului; *c* — idem, la studierea condițiilor de autopendulare a unui singur generator în raport cu barele centralei; *d* — schema în care generatoarele au RAT care acționează în funcție de parametrii individuali ai generatorului; *e* — schema pentru determinarea condițiilor de autopendulare a întregii centrale în raport cu tensiunea sistemului; *f* — idem, a unui singur generator în raport cu generatoarele centralei.

Scanned with OKEN Scanner

— RAT al fiecărui mașini reacționează la parametrii individuali, de exemplu curentul propriu al mașinii sincrone respective.

În cazul cînd pe generatoare se află dispozitivele RAT care acționează în funcție de parametrul general trebuie să se adauge la ecuațiile (5.1) încă o ecuație ce ține seama de procesele tranzitorii în sistemul de reglaj al mașinii k

$$U_{fdk} = W(p)\Delta i + U_{fd0k} =$$

$$= W(p)\left[\frac{i_{d0}}{i_0}\Delta i_d + \frac{i_{q0}}{i_0}\Delta i_q\right] + U_{fd0k}, \qquad (5.13)$$

care după liniarizare are forma

$$\Delta U_{fdk} = W(p)\left[\frac{i_{d0}}{i_0}\Delta i_d + \frac{i_{q0}}{i_0}\right]\Delta i_q.$$

Determinantul caracteristic al sistemului cu RAT se obține sub forma :

$$D(p) = H_1 H_2^{n-1} =$$

$$= \left\{\begin{vmatrix} a + (n-1)b & c + (n-1)d & m + (n-1)l \\ e + (n-1)f & g + (n-1)h & s + (n-1)w \\ A + (n-1)K & B + (n-1)L & F \end{vmatrix}\right\} \times$$

$$\times \left\{\begin{vmatrix} a - b & c - d & m - l \\ e - f & g - h & s - w \\ A - k & B - L & F \end{vmatrix}\right\}^{n-1} = 0. \qquad (5.14)^{1)}$$

Din determinantul caracteristic (5.14) se pot obține doi determinanți care, dezvoltați, au forma :

---

[1]) Expresiile coeficienților (5.14) se dau în anexa 8.

Scanned with OKEN Scanner

$$
H_1 = n \left| \begin{array}{c}
2p\left[\frac{x_d(p)}{n} + x_{ex}\right] + \left(\frac{R}{n} + R_{ex}\right) + 2p\,\frac{i_{d0}}{i_0}\,G(p)\,W(p); \\
(p^2-1)\left[\frac{x_d(p)}{n} + x_{ex}\right] + \left(\frac{R}{n} + R_{ex}\right)p + \\
+ x_C + (p^2-1)\,\frac{i_{d0}}{i_0}\,G(p)\,W(p); \\
i_{q0}\left\{\left[\frac{x_d(p)}{n} + x_{ex}\right] - \left(\frac{x_q}{n} + x_{ex}\right)\right\} + i_{q0}\,\frac{i_{d0}}{i_0}\,G(p)\,W(p); \\
(p^2-1)\left[\frac{x_q(p)}{n} + x_{ex}\right] - \left(\frac{R}{n} + R_{ex}\right)p - x_C + \\
+ 2p\,\frac{i_{q0}}{i_0}\,G(p)W(p); \\
2p\left[\frac{x_q(p)}{n} + x_{ex}\right] + \left(\frac{R}{n} + R_{ex}\right) + (p^2-1)\,\frac{i_{q0}}{i_0}\,G(p)\,W(p); \\
E_{d0}\left[\left(\frac{x_d}{n} + x_{ex}\right) - \frac{x_q(p)}{n} - x_{ex}\right]i_{d0} + \\
+ i_{q0}\,\frac{i_{q0}}{i_0}\,G(p)\,W(p); \\
\left[E_{d0} + i_{d0}\left(\frac{x_d}{n} + x_{ex}\right)\right]p^2 + \\
+ 2i_{q0}\left(\frac{x_q}{n} + x_{ex}\right)i_{d0}p - U\cos\delta_0; \\
i_{q0}\left(\frac{x_q}{n} + x_{ex}\right)p^2 - 2\left[E_{d0} + \left(\frac{x_d}{n} + x_{ex}\right)\times\right. \\
\left.\times\, i_{d0}\right]p + \left(\frac{R}{n} + R_{ex}\right)i_{q0} - U\sin\delta_0;
\end{array} \right| = 0 \quad (5.15)
$$

$$
H_2 = (p^2+1)\left| \begin{array}{lll}
x_d(p); & & -[x_q(p) + R]; \\
p x_d(p) + R; & & x_q(p); \\
i_{qk0}x_d(p) - \psi_{qk0}; & & \psi_{dk0} - i_{dk0}\,x_q(p);
\end{array} \right. \rightarrow
$$

$$
\rightarrow \left| \begin{array}{c}
\psi_{dk0} + U_G\sin\delta_0 \\
\psi_{qk0} - U_G\cos\delta_0 \\
T_J p^2
\end{array} \right| = 0. \qquad (5.16)
$$

Condiția (5.15) corespunde cazului în care o singură mașină sincronă echivalentă avînd parametri $\frac{1}{n} x_d(p)$; $\frac{1}{n} x_q(p)$; $\frac{1}{n} R$; nT_J, și regulator propriu de excitație, funcționează printr-o linie de transport pe un sistem de putere mare, a cărui tensiune este constantă în toate regimurile (fig. 5.2, *d*). Determinarea condițiilor de funcționare stabilă a unui asemenea sistem reglabil s-a făcut în capitolul 3.

Condiția (5.16) corespunde cazului cînd funcționează una din cele n mașini pe barele de tensiune dată U_G (fig. 5.2, *c*).

Întrucît sistemul de reglaj acționează în conformitate cu parametri generali, desigur că această circumstanță nu se reflectă în condițiile de stabilitate (5.16). Aceasta înseamnă că regulatoarele de excitație în funcție de parametrii generali (în particular în funcție de curentul liniei) influențează menținerea stabilității pe ansamblul întregii centrale în raport cu sistemul de putere mare și nu pot evita apariția mișcărilor relative între generatoare.

Cînd dispozitivul de reglare automată a excitației al fiecărei mașini (fig. 5.2, *d*) acționează asupra parametrilor individuali ai generatorului (de exemplu curentul), sistemul de ecuații (5.1) se completează cu relația

$$\Delta U_{fdk} = W(p) \left[\frac{i_{d0k}}{i_{0k}} \Delta i_{dk} + \frac{i_{q0k}}{i_{0k}} \Delta i_{qk} \right].$$

Astfel obținem determinantul caracteristic [1])

$$D(p) =$$

$$= H_1 H_2^{n-1} \begin{vmatrix} a + (n-1)b & c + (n-1)d & m + (n-1)l \\ e + (n-1)f & g + (n-1)h & s + (n-1)w \\ A & B & F \end{vmatrix} \times$$

$$\times \left\{ \begin{vmatrix} a - b & c - d & m - l \\ e - f & g - h & s - w \\ A & B & F \end{vmatrix} \right\} = 0. \qquad (5.17)$$

Ecuația $H_1 = 0$ corespunde condiției de funcționare a unui singur generator echivalent care reprezintă o întreagă

[1]) Coeficienții din (5.17) se dau în anexa 8 în funcție de parametrii sistemului.

Scanned with OKEN Scanner

centrală electrică și care are un regulator echivalent de excitație avînd funcția de transfer $\frac{1}{n} W(p)$ (fig. 5.2, *e*).

Din determinantul $H_2 = 0$ obținem condițiile de funcționare a oricărei mașini prevăzute cu regulatoare individuale și care funcționează pe bare avînd o tensiune dată U_G (fig. 5.2, *f*).

Deoarece sistemul de reglare a fiecărui generator intră în funcțiune o dată cu schimbarea parametrilor săi individuali, ceea ce se reflectă în ecuațiile $H_1 = 0$ și $H_2 = 0$ ce decurg din expresia determinantului caracteristic (5.17), regulatoarele menționate pot elimina cele două feluri de autopendulare. În acest caz trebuie asigurat un acord corespunzător a regulatoarelor de excitație.

Metoda de cercetare a ambelor scheme, considerată la studierea comportării în raport cu sistemul unei centrale cu mai multe mașini ale cărei generatoare au RAT, rămîne aceeași ca și în capitolul 3.

5.3. *Autopendularea mașinii sincrone legate printr-o linie de transport de energie cu un sistem receptor de putere comparabilă*

Pentru a găsi felul cum influențează procesele electromagnetice și electromecanice ce au loc în sistemul receptor și a căror considerare este necesară în cazul cînd centrala ce debitează pe sistemul receptor are puterea aproximativ aceeași cu a sistemului trebuie să se reprezinte sistemul sub forma unei centrale echivalente și a unei sarcini corespunzătoare (fig. 5.3, *a*).

Domeniile posibile de autopendulare în sistem (fig. 5.3, *a*) se găsesc prin analiza din punct de vedere al stabilității a ecuației caracteristice.

Ecuația caracteristică a sistemului poate fi obținută din analiza ecuațiilor proceselor tranzitorii în fiecare din mașini, cum și în linia de transport și în receptor.

În sistemul considerat, format din două mașini (fig. 5.3, *a*), regimul de mers în gol este cel mai periculos din punct de

Scanned with OKEN Scanner

vedere al perturbării stabilității sistemului datorită apariției autopendulării (fig. 5.3, *b*).

Se simplifică rezolvarea, renunțînd la procesul tranzitoriu din receptor. Se introduc reactanțele generatoarelor

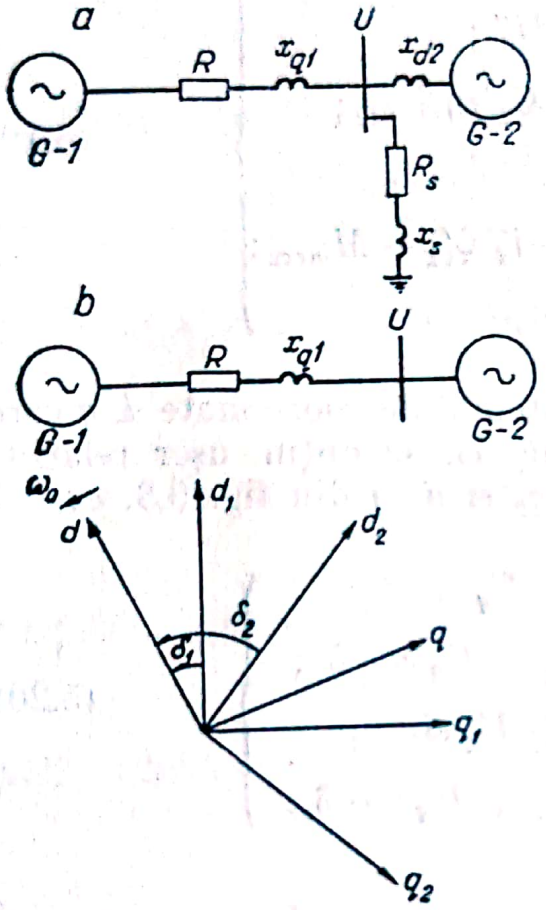


Fig. 5.3. Autopendularea în sistemul cu două centrale:
a — schema sistemului în sarcină; *b* — schema sistemului în gol; *c* — poziția axelor.

centralei *1* în reactanța liniei de transport. După aceste simplificări se găsesc ecuațiile caracteristice pentru acest regim, cel mai periculos pentru sistem:

$$\left.\begin{aligned}
&-p\psi'_{d1} - \psi'_{d1}\,p\gamma_1 - Ri'_d = U'_d;\\
&-p\psi'_{q1} + \psi'_{d1}\,p\gamma_1 - Ri'_q = U'_q;\\
&\psi'_{d1} = x_{d1}(p)\,i'_d + G(p)\,U_{fd1};\\
&\psi'_{q1} = x_{q1}(p)i'_q;\\
&T_{j1}p^2\gamma_1 = M_{mec1} - (i'_q\psi'_{d1} - i'_{d1}\psi'_{q1});\\
&p\gamma_1 = 1 + p\delta_1.
\end{aligned}\right\} \quad (5.18)$$

Pentru a doua centrală ecuațiile proceselor tranzitorii electromagnetic și electromecanic sînt de forma [1]):

$$\left.\begin{aligned}
&p\psi''_{d2} + \psi''_{q2}p\gamma_2 = U''_d\,;\\
&p\psi''_{q2} - \psi''_{d2}p\gamma_2 = U''_q\,;\\
&\psi''_{d2} = x_{d2}(p)i''_d + G_2(p)\,U_{fd2}\,;\\
&\psi''_{q2} = x_{q2}(p)i''_d\,;\\
&T_{J2}p^2\gamma_2 = i''_{q2}\,\psi''_{q2} - i''_d\,\psi''_{q2} - M_{mec2}\,;\\
&p\gamma_2 = 1 + p\delta_2.
\end{aligned}\right\} \qquad (5.19)$$

Dacă se admite că există sistemul de coordonate d, q care se învîrtește cu viteza sincronă ω, se obțin ușor relațiile dintre coordonatele d_1, d_2, q_1, q_2 și d, q din fig. 5.3, *c*:

$$\left.\begin{aligned}
U'_d &= U_d \cos\delta_1 + U_q \sin\delta_1\,;\\
U'_q &= -\,U_d \sin\delta_1 + U_q \cos\delta_1\,;\\
U''_d &= U_d \cos\delta_2 + U_q \sin\delta_2\,;\\
U''_q &= -\,U_d \sin\delta_2 + U_q \cos\delta_2.
\end{aligned}\right\} \qquad (5.20)$$

Relațiile analoge pot fi obținute pentru curenți și fluxuri.

Sub formă de variații ale variabilelor U_d, U_q, U'_q, U'_q, U''_d, U''_q δ_1 și δ_2 ecuațiile (5.18) și (5.19) pot fi scrise

$$\left.\begin{aligned}
&-p\Delta\psi'_{d1} - \Delta\psi'_{q1} - R\Delta i'_d - \psi_{q01}p\Delta\delta_1 = \Delta U'_d\,;\\
&\Delta\psi'_{d1} - p\Delta\psi'_{q1} - R\Delta i'_q + \psi_{d01}p\Delta\delta_1 = \Delta U'_q\,;\\
&\Delta\psi'_{d1} = x_{d1}(p)\Delta i'_d\,;\\
&\Delta\psi'_{q1} = x_{q1}(p)\,\Delta i'_q\,;\\
&T_{J1}p^2\Delta\delta_1 + i_{q0}\Delta\psi'_{d1} - i_{d0}\,\Delta\psi'_{q1} - \psi_{q01}\Delta i'_q +\\
&\qquad + \psi_{d01}\Delta i'_q = 0.
\end{aligned}\right\} \qquad (5.21)$$

---

[1]) Axele d_2, q_2 sînt legate de rotorul mașinii G-2.

Scanned with OKEN Scanner

$$
\left.
\begin{aligned}
& p\Delta\psi''_{d2} - \Delta\psi''_{q2} + \psi_{q02}\, p\Delta\delta_2 = \Delta U''_d\,; \\
& -\Delta\psi''_{d2} + p\Delta\psi''_{q2} + \psi_{d02}\, p\Delta\delta_2 = \Delta U''_q\,; \\
& \Delta\psi''_{d2} = x_{d2}(p)\,\Delta i''_d\,; \\
& \Delta\psi''_{q2} = x_{q2}(p)\,\Delta i''_q\,; \\
& T_{j2}p^2\Delta\delta_2 - i_{q0}\Delta\psi''_{d2} + \Delta\psi''_{q2} i_{d0} + \psi_{q02}\Delta i''_d - \\
& \qquad - \psi_{d02}\Delta i''_q\,.
\end{aligned}
\right\} = 0 \qquad (5.22)
$$

Ecuația (5.20) scrisă cu ajutorul variațiilor finite are expresia :

$$
\left.
\begin{aligned}
& \Delta U'_d = \Delta U_d \cos\delta_{01} + \Delta U_q \sin\delta_{01} + (-U_{d0}\sin\delta_{01} + \\
& \qquad + U_{q0}\cos\delta_{01})\,\Delta\delta_1\,; \\
& \Delta U'_q = -\Delta U_d \sin\varphi_{01} + \Delta U_q \cos\delta_{01} - (U_{d0}\cos\delta_{01} + \\
& \qquad + U_{q0}\sin\delta_{01})\,\Delta\delta_1\,; \\
& \Delta U''_d = \Delta U_d \cos\delta_{02} + \Delta U_q \sin\delta_{02}) + (-U_{d0}\sin\delta_{02} + \\
& \qquad + U_{q0}\cos\delta_{02})\,\Delta\delta_2\,; \\
& \Delta U''_q = -\Delta\delta_d \sin\delta_{02} + \Delta U_q \cos\delta_{02} - \\
& \qquad - (U_{d0}\cos\delta_{02} + U_{q0}\sin\delta_{02})\,\Delta\delta_2.
\end{aligned}
\right\} \qquad (5.23)
$$

Deoarece ecuația caracteristică a sistemului se analizează pentru regimul de mers în gol, trebuie să se țină seama de condițiile ce au loc în acest regim :

$$
\left.
\begin{aligned}
& E_{d10} = E_{d2} = U_q = U_0 = 1\,; \\
& \delta_{01} = \delta_{02} = 0^\circ\,; \\
& \psi_{d01} = \psi_{d02} = 1\,; \\
& \psi_{q01} = \psi_{q02} = 0.
\end{aligned}
\right\} \qquad (5.24)
$$

Scanned with OKEN Scanner

Din ecuațiile (5.21) și (5.24) se obține ecuația caracteristică a sistemului în formă nedezvoltată

$$D(p) = p^2\{p[x_{d1}(p) + x_d^2(p)] + R\}\{p[x_{d2}(p) + x_{q2}(p)] + R\} + p^2[x_{d1}(p) + x_{d2}(p)][x_{q1}(p) + x_{q2}(p)] + \left(\frac{1}{T_{J1}} + \frac{1}{T_{J2}}\right)\{p^2[x_{d1}(p) + x_{d2}(p)] + pR + [x_{d1}(p) + x_{d2}(p)]\} = 0. \quad (2.25)$$

Studierea ecuației (5.25) dă posibilitatea să se determine condițiile de autopendulare a generatoarelor centralei debitoare.

Analizînd cel mai greu caz din punct de vedere al apariției autopendulării, și anume: mașinile din centrala debitoare nu au înfășurări de amortizare, iar turbogeneratoarele sistemului receptor sînt prevăzute cu înfășurare de amortizare transversală și după transformările din (5.25) se obține ecuația caracteristică de gradul șapte

$$D(p) = a_0p^7 + a_1p^6 + a_2p^5 + a_3p^4 + a_4p^3 + a_5p^2 + a_6p + a_7 = 0. \quad (5.26)$$

Expresiile coeficienților ecuației caracteristice (5.26) se găsesc în anexa 9.

Folosind metoda divizării se obțin domeniile de stabilitate a sistemelor în coordonatele T_{Q2}, $T_{Je} = \frac{T_{J1}\,T_{J2}}{T_{J1} + T_{J2}}$.

Rezultatele calculelor se dau sub formă de curbe și sînt reprezentate în fig. 5.4. Din desen se vede că întregul domeniu de stabilitate se află mai la dreapta decît axa ordonatelor T_{Je}.

Deci în regimul de mers în gol este posibilă apariția, în sistemul analizat, a autopendulării, dacă pe turbogeneratoarele sistemului receptor nu există înfășurări de amortizare pe axa longitudinală. Această autopendulare ce apare în regimul de mers în gol se îndepărtează dacă T_{Je} se găsește între limitele ($10^3 - 6 \cdot 10^3$) rad, iar T_{Q2} — în gama ($1{,}5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^3$) rad deși pe mașinile centralei debitoare nu se găsesc înfășurări de amortizare.

Turbogeneratoarele mari moderne au constante de timp pentru înfășurările de amortizare cu valori de ordinul cîtorva sute de radiani. Deci, în sistemul ce are asemenea mașini, autopendularea nu trebuie să creeze piedici pentru cazul regimurilor de exploatare normală.

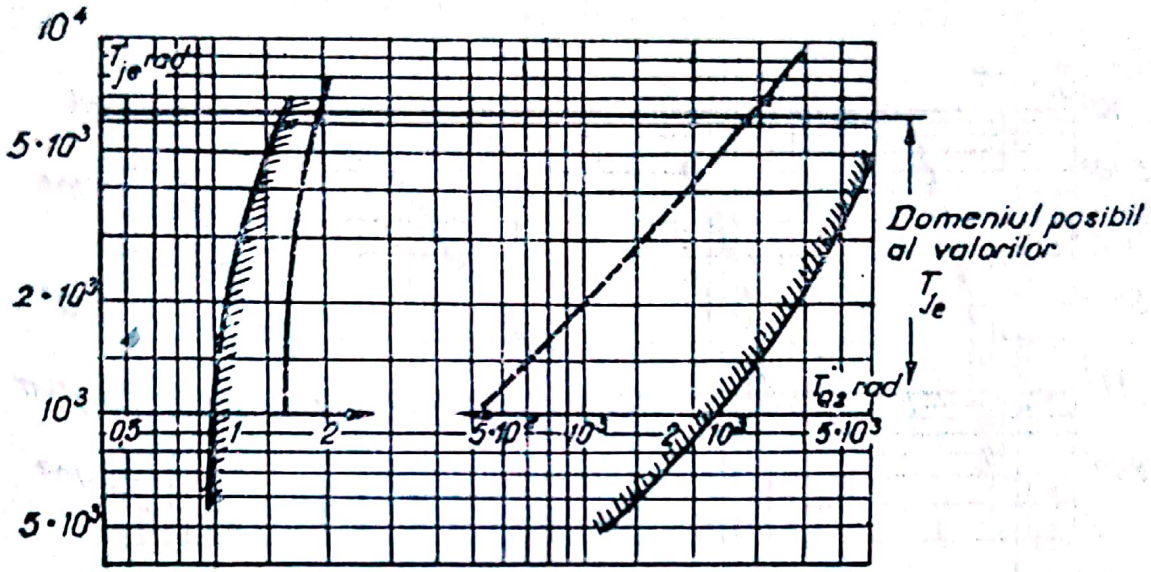


Fig. 5.4. Domeniile de stabilitate a sistemului (fig. 5.3, *b*) în funcție de condițiile de autopendulare în coordonatele T_{Q2}, T_{Je}.

Studiul influenței puterii sistemului receptor asupra condițiilor de îndepărtare a autopendulării se mai poate face folosind ecuația caracteristică (5.26).

În fig. 5.5 s-au construit domeniile de autopendulare în schema cu două mașini la diverse puteri ale sistemului receptor. Din acest desen se vede că creșterea puterii sistemului receptor duce la mărirea valorii minime a constantei de timp T_{Q2}; în același timp valoarea limită superioară a lui T_{Q2} scade repede. La un raport oarecare între puterea centralei debitoare și puterea sistemului receptor, domeniul stabilității dispare complet; aceasta înseamnă că înfășurarea de amortizare a generatoarelor sistemului receptor nu este capabil să elimine autopendularea generatoarelor centralei debitoare.

Dacă în schema reprezentată în fig. 5.3 se consideră neschimbată tensiunea U la capătul liniei de transport, pentru îndepărtarea autopendulării generatoarelor centralei debitoare, va trebui ca aceasta să fie echipată cu înfășurări de amortizare transversale (domeniul de stabilitate în coor-

donatele T_{J1} și T_{Q1} este reprezentat prin curbe punctate în fig. 5.4.).

Comparînd domeniile de stabilitate obținute (fig. 5.4) se observă că luarea în considerare a proceselor electromecanice ce au loc în sistemul receptor, extinde întru-cîtva

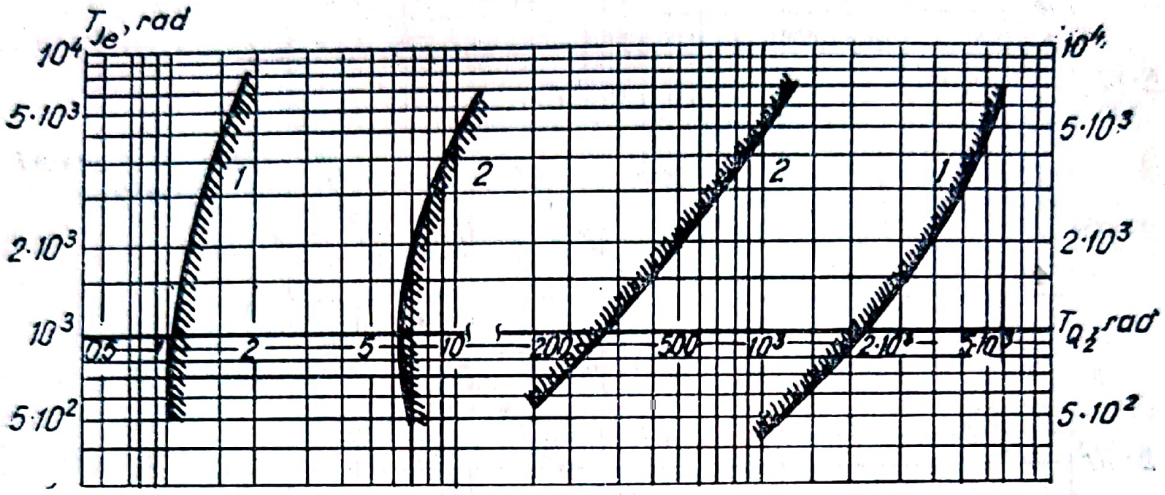


Fig. 5.5 Deformarea domeniilor de stabilitate la variația puterii sistemului receptor:

1 — puterea centralei debitoare este aproximativ aceiași cu a sistemului receptor, $\frac{x_{d2}}{x_{d1}} = 1$; *2* — la creșterea de cinci ori a puterii sistemului receptor.

domeniul stabilității, adică ușurează cerințele impuse parametrilor înfășurărilor de amortizare pentru îndepărtarea autopendulării. Cu alte cuvinte la aceeași parametri ai înfășurărilor de amortizare din mașinile sincrone, domeniul autopendulării din schema „centrală-bare" este mai mare decît în sistemul cu două mașini. Acest fapt poate fi arătat analitic destul de simplu. Pentru simplitatea cercetărilor nu se iau în considerare în schema reprezentată în fig. 5.3, *a* procesele tranzitorii din circuitele statorului.

Ecuația caracteristică a sistemului este în acest caz

$$T_{d0}m'_{11}p^3 + m_{11}p^2 + T_{d0}(m'_{11}S_{12} - n'_{12}P'_{12})p +$$

$$+ (m_{11}S_{12} - n_{12}P'_{12}) = 0, \qquad (5.27)$$

în care :

$$\left.\begin{aligned}
m'_{11} &= 1 + (x'_{d1} - x_{q1})\, y_{11Q} \cos \alpha_{11Q};\\
m_{11} &= 1 + (x_{d1} - x_{q1})\, y_{11Q} \cos \alpha_{11Q}\\
n'_{12} &= (x'_{d1} - x'_{q1}) y_{12a}\, E_{d2} \sin (\delta_{12} - \alpha_{12Q});\\
n_{12} &= (x_{d1} - x_{q1})\, y_{12Q}\, E_{d2} \sin (\delta_{12} - \alpha_{12Q});\\
S_{12} &= E_{q1} E_{d2} y_{12Q} \left[\frac{1}{T_{J1}} \cos (\delta_{12} - \alpha_{12Q}) + \right.\\
&\qquad \left. + \frac{1}{T_{J2}} \cos (\delta_{12} + \alpha_{12Q})\right];\\
P'_{12} &= \frac{1}{T_{J1}} [2E_{q1} y_{11Q} \sin \alpha_{11Q} +\\
&\quad + E_{d2}\, y_{12Q} \sin (\delta_{12} - \alpha_{12Q})] +\\
&\quad + \frac{1}{T_{J2}} E_{d2}\, y_{12Q} \sin (\delta_{12} + \alpha_{12Q}).
\end{aligned}\right\} \qquad (5.28)$$

La sarcini reduse, coeficienții ecuației (5.27) sînt esențial pozitivi și în acest caz condițiile de instabilitate se determină cu ajutorul penultimului determinat Hurvitz, adică

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} m_{11} & m_{11} S_{12} - n_{12} P'_{12} \\ T_{d0} m'_{11} & (m'_{11} S_{12} - n'_{12} P'_{12}) T_{d0} \end{vmatrix} =$$

$$= T_{d0} (m'_{11} n_{12} - m_{11} n'_{12}) P'_{12} \leqslant 0$$

sau :

$$T_{d0} \left[\frac{1}{T_{J1}} \sin (\delta_{12} - \alpha_{12Q}) + \frac{1}{T_{J2}} \sin (\delta_{12} + \alpha_{12Q}) + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{T_{J1}} \frac{2E_{q1} y_{11Q} \sin \alpha_{11Q}}{E_{d2} y_{12Q}}\right] (x_{d1} - x'_{d1}) \times$$

$$\times\, y_{12Q}\, E_{d2} \sin (\delta_{12} - \alpha_{12Q}) \leqslant 0. \qquad (5.29)$$

Scanned with OKEN Scanner

Din ecuația (5.29) se obțin două condiții de apariție a autopendulării în sistemul cu două mașini și anume :

$$\left.\begin{aligned} &\delta_{12} \leqslant \alpha_{12Q}; \\ &T_{J1} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12Q}) + T_{J2} \sin(\delta_{12} + \alpha_{12}) + \\ &\quad + \frac{1}{T_{J1}} \frac{2E_{q1} y_{11Q} \sin \alpha_{11Q}}{E_{d2} y_{12Q}} \geqslant 0. \end{aligned}\right\} \quad (5.30)$$

Condiția (5.30) corespunde frontierei inferioare a domeniului de autopendulare care se aplică pentru unghiurile negative δ_{12}.

Prima inegalitate (5.30) poate fi scrisă dezvoltat astfel

$$\delta_{12} \leqslant \alpha_{12Q} = \operatorname{arc\,tg} \frac{R - \dfrac{(R_s x_{q1} - R x_s) x_{d2}}{R_s^2 + x_s^2}}{x_{q1} + x_{d2} + \dfrac{(R_s R + x_s x_{q1}) x_{d2}}{R_s^2 + x_s^2}}. \quad (5.31)$$

Această condiție a apariției autopendulării se aseamănă ca aspect cu partea dreaptă a inegalității (3.8), care determină autopendularea generatorului din schema „centrală-bare" în cazul cînd mașina nu era excitată.

Criteriul (5.31) se referă la schema cu două mașini cu sarcină activă și reactivă unde α_{12Q} are de obicei valoarea negativă, ceea ce corespunde posibilității apariției autopendulării pentru $\delta_{12} < 0$. Ultima situație este posibilă numai în cazul funcționării generatoarelor centralei în regimul de compensatoare sincrone.

Prin urmare, la orice regim posibil de generator al centralei, autopendularea generatoarelor nu este de așteptat. Dacă însă mașinile centralei debitoare și receptoare funcționează în gol, valoarea $\alpha_{12Q} + \operatorname{arc\,tg} \dfrac{R}{x_{q1} + x_{d2}}$ este maximă, adică corespunde celui mai dificil regim de lucru în sensul autopendulării.

Deoarece relația $\dfrac{R_1}{x_{q1}}$ este todeauna mai mare decît $\dfrac{R}{x}$ pentru sistemul receptor, la funcționarea centralei în sistemul cu două mașini unghiuri α_{12Q} este totdeauna mai mic decît

$\alpha_{11Q} = \frac{R_1}{x_{q1}}$, cînd generatorul funcționează pe bare de tensiune neschimbată.

Așadar, autopendularea din sistemul cu două centrale este mai puțin probabilă decît în schema „centrală-bare" de tensiune constantă și apariția fenomenului de autopendulare în sistemul celor două centrale este cel mai probabil să apară la mersul în gol. De aceea, determinarea condițiilor de apariție a autopendulării în sistemul a două centrale trebuie să se facă pornind tocmai de la acest regim al sistemului. Rezultatele cercetărilor analitice de autopendulare a mașinilor din sistemele complexe au fost verificate experimental în laboratorul de cercetări în domeniul sistemelor electrice al Institutului de energetică din Moskova, pe schema ce reprezintă linia de transport Moskova-Centrala hidroelectrică de pe Volga (modelul liniei). La începutul liniei de transport s-a conectat o rezistență suplimentară $R = 3{,}2\ \Omega$, ceea ce corespunde măririi de șase ori a rezistenței liniei de transport a energiei. De pe modelul de hidrogenerator s-au scos înfășurările de amortizare. Sistemul receptor a fost modelat cu ajutorul unui turbogenerator și a unui receptor sub formă de motor asincron.

Cînd tensiunea U a sistemului receptor a fost neschimbată adică hidrogeneratorul a funcționat pe barele de tensiune constantă printr-o linie de transport a energiei, la $x_C = 12\ \Omega$, corespunzător la 25% din compensarea reactanței liniei de transport, în sistem, s-a observat autopendularea la sarcinile $P \leqslant 0{,}2$ față de puterea maximă activă transportată pe linie.

Dacă însă tensiunea sistemului receptor poate să varieze în diverse regimuri, adică în schemă pe model s-a inclus în locul transformatorului de legătură un turbogenerator sau un turbogenerator cu motor asincron, chiar la mărirea cu de trei ori a reactanței capacitive de compensare longitudinală nu a apărut autopendularea. Rezultatele experiențelor se explică prin aceea că prin conectarea în sistem a unui simplu turbogenerator sau a unui turbogenerator împreună cu un alt receptor, se micșorează unghiul α_{12Q}, ceea ce îngreuiează apariția autopendulării. Existența însă pe rotorul turbogeneratorului, a înfășurărilor de amortizare elimină posibilitatea apariției acestui fenomen. Așa dar, experiențele confirmă concluziile obținute analitic; fenomenul autopendulării

în sistemul complex este mai puţin probabil decît în sistemul simplu „centrală-bare".

Folosind metoda de cercetare a autopendulării expusă, la sisteme mai complicate, putem face următoarea afirmaţie: posibilitatea apariţiei autopendulării fiecărei maşini din sistemul complex se cercetează la o tensiune constantă la bornele celorlalte maşini. Dacă la sarcini reduse fiecare maşină nu este supusă autopendulării, sistemului complex studiat funcţionează în ansamblu stabil la sarcini mici. După fixarea tensiunii la barele generatoarelor, sistemul complex se transformă într-altul simplu.

Metoda de cercetare analitică a autopendulării unei asemenea scheme s-a dat amănunţit în capitolul 3.

Scanned with OKEN Scanner

CAPITOLUL 6

Exemple de calcul ale autoexcitării și autopendulării

Necesitatea efectuării calculelor, pentru găsirea condițiilor de autoexcitare și autopendulare a mașinilor, apare îndeosebi cu ocazia proiectării centralelor, liniilor de transport a energiei sau a altor elemente ce intră într-un sistem electric. Mai rar se întîlnesc asemenea calcule în exploatare. Totuși și aici sînt necesare asemenea calcule îndeosebi în cazurile cînd în timpul exploatării se introduc unele măsuri care schimbă caracteristicile diverselor elemente și îmbunătățesc funcționarea în ansamblu al sistemului electric. Un asemenea exemplu îl constituie construirea de noi instalații de compensare capacitivă sau de mărire a gradului de compensare la liniile existente. Și într-un caz și în altul trebuie să se verifice dacă nu cumva gradul de compensare adoptat nu duce la autopendularea sau autoexcitarea mașinilor în unele regimuri. Un asemenea calcul pentru cele mai caracteristice cazuri, analizează :

— regimul de sincronizare cu sistemul receptor a unei linii de transport a energiei;

— dispariția bruscă a sarcinii și deconectarea de la sistem a liniei de transport;

— funcționarea unei mașini mici la sarcini reduse;

— autoexcitarea mașinilor sincrone în sistemele complexe;

— autoexcitarea motoarelor asincrone în regimurile staționare și de pornire.

Sincronizarea cu sistemul receptor a unei linii de transport a energiei. Analiza pornește de la condițiile sincronizării unei

centrale electrice *CE-1*, legată cu un sistem receptor printr-o linie cu tensiunea de 330 kV. La centrala *CE-1* sînt montate două turbogeneratoare TVV-200-2 ai căror parametri, cum și parametri transformatoarelor ridicătoare *T-1* și ai liniei *L-1* sînt reprezentați în fig. 6.1, *a*. Sincronizarea este posibilă pe întrerupătoarele *I-1*, *I-2*, montate la centrala *CE-1* și la stația principală a sistemului receptor. În timpul sincronizării, la stație linia *L-1* se conectează prin șoc la sistemul receptor; sincronizarea la stația sistemului receptor poate fi procedată de creșterea de la zero a tensiunii liniei.

Determinarea posibilității apariției autoexcitării generatoarelor de la centrala *CE-1* în cazul sincronizării pe întrerupătorul *I-2* se face cu ajutorul schemei echivalente reprezentată în fig. 6.1, *b*, unde reactanțele tuturor elementelor sînt date în ohmi. Schema reprezentată în fig. 6.1, *b* poate fi ușor adusă la schema reprezentată în fig. 6.1, *c*, în care generatorul este conectat la impedanța echivalentă $Z_e = 4{,}13 - j\,795\,\Omega$. Zona autoexcitării, găsită cu relația (2.31) în cazul cînd la centrala *CE-1* funcționează un singur turbogenerator, este reprezentată în fig. 6.1, *d*. Tot acolo se indică punctul corespunzător impedanței echivalente obținute Z_e. Din fig. 6.1, *d* rezultă că introducerea unui singur generator pe linia ce funcționează fără sarcină poate atrage fenomenul de autoexcitare; sincronizarea pe întrerupătorul stației principale *I-2* poate fi făcută numai cu două generatoare ale centralei *CE-1*. În ultimul caz, limita superioară a zonei de autoexcitare se determină cu reactanța

$$x_{de} = \frac{946}{2} < 795.$$

Aceasta înseamnă că punctul care reprezintă impedanța echivalentă Z_e se va găsi în afara limitelor zonei.

Dacă se presupune că la centrala *CE-1* sînt montate hidrogeneratoare, a căror posibilitate de autoexcitare în momentul sincronizării se verifică, calculul rămîne același cu excepția că în afara zonei *II* de autoexcitare asincronă se construiește și zona *I* de autoexcitare sincronă. Și într-un caz și în altul, adică la analiza condițiilor autoexcitării turbo-și hidrogeneratoarelor, zona *III* se construiește numai atunci cînd componenta imaginară a impedanței Z_e este mai mică decît valoarea x'_d a mașinii. În acest caz în calculele aproximative

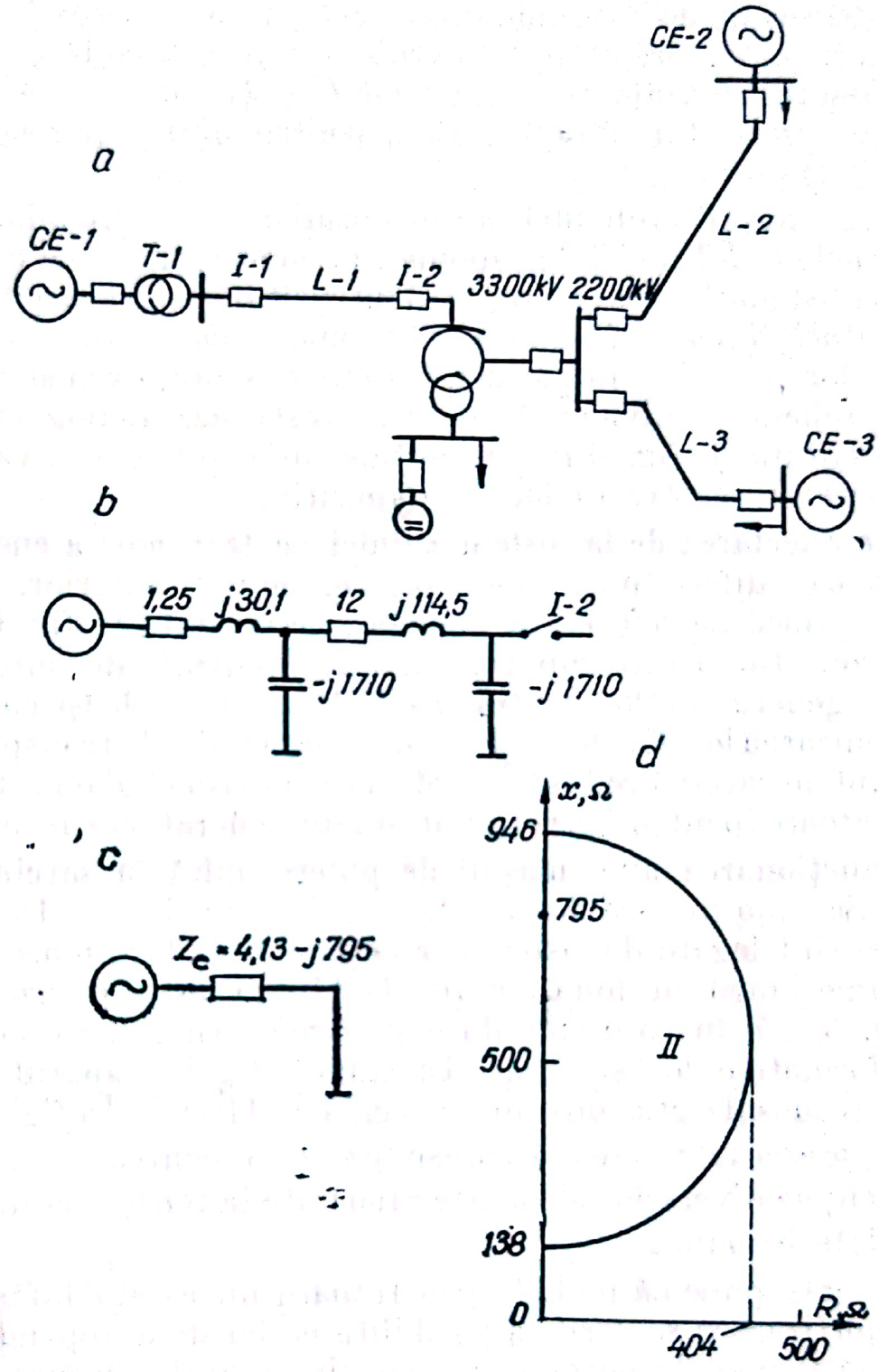


Fig. 6.1. Determinarea condiţiilor de sincronizare cu sistemul unei centrale depărtate:

a — schema sistemului şi parametrii:

CE-1: TVV-200-2, $\cos\varphi = 0{,}85$, $x_d = 185\%$, $x'_d = 27\%$, $U_n = 15{,}75$ kV;
T-1: $2 \times 2\,400$ MVA, $U_k = 12\%$; $r = 0{,}5\%$; $k_T = 347/15{,}75$;
L-1: 350 km, $2 \times$ OL-Al-500, $x_0 = 0{,}327$ Ω/km; $b_0 = 3{,}34 \cdot 10^{-6}$ 1/Ωkm, $r_0 = 0{,}0342$ Ω/km; *b* — schema echivalentă; *c* — schema echivalentă redusă; *d* — zona autoexcitării turbogeneratorului.

nu este nevoie de determinarea exactă a limitei acestei zone' ci ne putem mărgini la construirea convențională pornind din punctul de conjunctură a zonelor *II* și *III*, care corespunde valorii rezistenței $R = 8 - 15\%$ pentru hidro- și respectiv turbogeneratoare.

Este puțin probabilă autoexcitarea generatoarelor din centralele *CE-2* și *CE-3* în momentul conectării în gol a liniei *L-1* pe sistemul receptor (fig. 6.1) întrucît în acest caz acțiunea capacității liniei va fi diminuată în mare măsură de influența sarcinilor conectate în paralel. Cu alte cuvinte, dacă se reprezintă schema echivalentă pentru acest caz, analog cu cea reprezentată în fig. 6.1, *c* se obține impedanța echivalentă cu caracter reactiv în loc de capacitiv.

Deconectarea de la sistem a liniei de transport a energiei. Acest caz diferă puțin de cazul examinat anterior. Într-adevăr, dacă ne referim la schema reprezentată în fig. 6.1, *a* la deconectarea întrerupătorului *I-2*, condițiile de autoexcitare a generatoarelor centralei *CE-1*, vor fi aceleași ca și la sincronizarea lor. Evident că deconectarea liniei de transport în regimul de sarcină redusă este mai periculoasă cînd o parte din generatoare (pentru fig. 6.1, *a* un singur generator) sînt oprite.

Funcționarea unei mașini de putere mică la sarcini reduse. Schema în care două hidrogeneratoare de cîte 15 MVA fiecare sînt legate de sistemul receptor de putere mare printr-o linie lungă cu două circuite la 110 kV este reprezentată în fig. 6.2, *a* în care sînt date și parametrii generatoarelor, transformatoarelor și liniei. Tensiunea U_C la capătul liniei poate fi considerată constantă și egală cu 110 kV. În fig. 6.2, *b* este reprezentată schema corespunzătoare echivalentă, unde rezistențele diverselor elemente raportate la tensiunea liniei [1]) sînt date în ohmi.

Se presupune că pe hidrogeneratoare nu există înfășurări de amortizare și se verifică posibilitatea lor de autopendulare în două regimuri : normal în cazul liniei cu dublu circuit și, după avarie, cînd un circuit este deconectat.

Regimul normal. Unghiul limită δ care determină limita superioară a autopendulării, îl găsim cu relația (3.9) consi-

---

[1]) Se neglijează rezistența generatoarelor.

derînd coeficientul de corecţie K

$$\delta_n = \text{arc tg}\,\frac{R}{x_{q\Sigma}} = \text{arc tg}\,\frac{4{,}22 + 32{,}2}{244 + 51{,}1 + 20} = \text{arc tg}\,0{,}115 = 6{,}5°;$$

unghiul de defazare a lui $z_{q\Sigma}$ este egal cu

$$\varphi = \text{arc tg}\,\frac{x_{q\Sigma}}{R} = 90° - 6{,}5° = 83{,}5°.$$

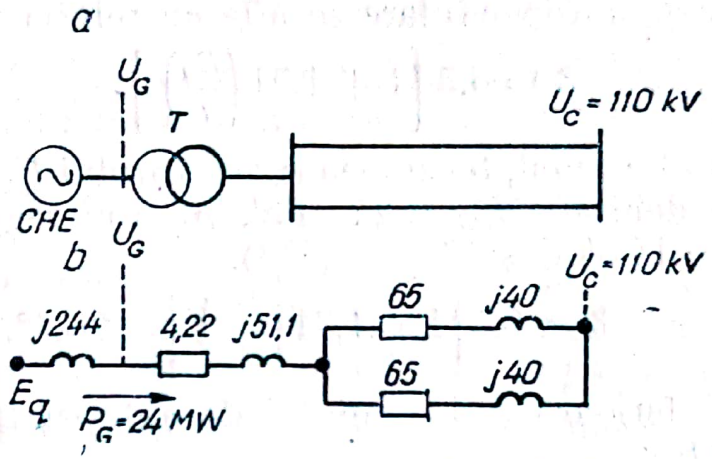


Fig. 6.2. Sistemul analizat:
a — sistemul propriu-zis; *b* — schema echivalentă.
Parametrii sistemului sînt:
CHE: 2×12 MVA; cos φ = 0,8; x_d = 0,815; x_q = = 0,50, x''_d = 0,20; T_{d0} = 4 s; T_J = 3 s;
Transformatoarele: 2 × 15 MVA; U_k = 10,5 s%; ΔP_U = 130 kW; k_T = 121/10,5;
Linia: 100 km, 2×OL-Al-50, x_0 = 0,4Ω/km, r_0 = = 0,65 Ω/km.

În fig. 3.5 avem pentru $\frac{R}{x_{q\Sigma}} = 0{,}115$, coeficientul de corecţie $K = 4{,}1$. Întrucît parametrii sistemului analizat diferă de cei folosiţi la construirea curbei reprezentată în fig. 3.5, pentru găsirea coeficientului de corecţie K' utilizăm relaţia (3.10):

$$K' = 0{,}242\,K\,\frac{T_{d0}}{T_J}\,\frac{z_{q\Sigma}}{x_d - x'_d} = 0{,}242 \times 4{,}1\,\frac{4}{3}\cdot\frac{318}{397-151} = 1{,}71,$$

în care:

$$z_{q\Sigma} = \frac{x_{q\Sigma}}{\sin\psi};$$

$$x_{q\Sigma} = \frac{244 + 51{,}1 + 20}{\sin 83{,}5°} = 318\ \Omega;$$

$$x_\Omega = x\,\frac{(U_B)^2}{S_B};$$

iar

$$x_d = 0{,}815 \frac{121^2}{30} = 397\ \Omega;$$

$$x'_d = 0{,}31 \frac{121^2}{30} = 151\ \Omega.$$

Unghiul limită, care determină limita superioară a domeniului de autopendulare se află cu relația (3.9)

$$\delta = 6{,}5 \left[1 + 1{,}71 \left(\frac{E_q}{U}\right)^2\right].$$

În regimul normal, tensiunea generatorului $U_G = 121$ kV, iar puterea debitată $P_G = 24$ MW. Acestui regim îi corespunde $E_q = 147$ kV și $\delta = 25{,}4°$ [1]).

Atunci
$$\delta = 6{,}5 \left[1 + 1{,}71 \left(\frac{147}{110}\right)^2\right] = 26{,}4°.$$

Limita inferioară a domeniului de autopendulare se găsește cu (3.8):

$$\delta = 6{,}5° - \text{arc sin} \left(\frac{2 \cdot 147}{110} \sin 6{,}5°\right) = -11{,}1°.$$

Regimul de după avarie. În acest regim, cînd în funcțiune rămîne numai un singur circuit al liniei, se poate determina prin calculele corespunzătoare ca la menținerea tensiunii generatorului $U_G = 121$ kV și a puterii debitate $P_G = 24$ MW, se obțin valorile t.e.m. $E_q = 133$ kV și unghiul $\delta = 29{,}1°$.

Calculele pentru determinarea limitei zonei de autopendulare se efectuează la fel cu cele pentru regimul normal.

Găsim unghiul δ_n

$$\delta_n = \text{arc tg} \frac{4{,}22 + 65}{244 + 51{,}1 + 40} = \text{arc tg}\, 0{,}206 = 11{,}6°.$$

Coeficientul de corecție $K = 3{,}1$ se obține din fig. 3.5. Modulul impedanței $z_{q\Sigma}$ se află astfel:

$$z_{q\Sigma} = \frac{244 + 51{,}1 + 40}{\sin 78{,}4°} = 342\ \Omega,$$

unde:
$$\psi = 90° - 11{,}6° = 78{,}4°.$$

---

[1]) Nu se dă calculul de determinare al lui E_q și δ la valori date U_G, U_C și P_G, întrucît acestea se determină cu ajutorul metodelor obișnuite de calcul a regimurilor normale.

Mai departe se determină coeficientul de corecție K'

$$K' = 0{,}242 \cdot 3{,}1 \frac{4}{3} \frac{342}{397 - 151} = 1{,}39.$$

Limita superioară a domeniului de autopendulare se determină pentru $E_q = 133$ kV cu ajutorul relației

$$\delta = 11{,}6° \left[1 + 1{,}39 \left(\frac{133}{110}\right)^2\right] = 35{,}2°.$$

Unghiul corespunzător limitei inferioare a domeniului de autopendulare este egal cu

$$\delta = 11{,}6° - \arcsin\left(\frac{2 \cdot 133}{110} \sin 11{,}6°\right) = -17{,}7°.$$

Deci generatoarele fără înfășurări de amortizare din centrala hidroelectrică au tendința spre autopendulare atît în regimul normal, cît și în cel de după avarie, deoarece

$26{,}4° > 25{,}4° > -11{,}1°$ în regimul normal;

$35{,}2° > 29{,}1° > -17{,}7°$ în regimul de după avarie.

Se determină mai departe constanta de timp minimă T_Q a înfășurării transversale de amortizare la care autopendularea se îndepărtează prin regimul (cînd este conectat un singur circuit al liniei) cel mai dificil din punct de vedere al autopendulării. Pentru acest scop se folosește expresia (3.16).

Se scriu în prealabil reactanțele schemei în unități relative. Luînd ca mărimi de bază puterea $S_B = 30$ MVA și tensiunea $U_B = 110$ kV a generatorului echivalent din hidrocentrală se obține:

$$x_{d\Sigma} = 1{,}21; \quad x_{q\Sigma} = 0{,}83; \quad x'_{d\Sigma} = 0{,}6; \quad x''_{q\Sigma} = 0{,}467; \quad R = 0{,}172.$$

Constanta de timp minimă pentru regimul de mers în gol ($E_q = U_C = 1$)

$$T_Q = \frac{3}{4} \cdot \frac{0{,}172^2(1{,}21 - 0{,}6)(0{,}6 \cdot 0{,}83 + 0{,}172^2)}{0{,}6^3(0{,}83 - 0{,}467)} +$$

$$+ \frac{0{,}172(0{,}6^2 - 0{,}172^2)}{0{,}6^2(0{,}83 - 0{,}467)} = 0{,}82 \text{ rad.}$$

Înfășurarea de amortizare de construcție obișnuită are constanta de timp T_Q de ordinul cîtorva zeci de radiani. De aceea în schema concretă dată, în cazul că există înfășurări

Scanned with OKEN Scanner

de amortizare la generatoarele centralei hidroelectrice, nu se observă autopendularea generatoarelor.

Autoexcitarea mașinilor sincrone în sistem complex. Se analizează sistemul format din trei centrale (fig. 6.3, *a*). Hidrogeneratorul *G-1* este legat cu sistemul receptor printr-o linie compensată; sistemul este reprezentat prin hidrogeneratorul *G-2* și turbogeneratorul *G-3*. La barele sistemului receptor este conectată o sarcină echivalentă *N*. Reactanța externă în circuitul generatorului *G-1* este $x_{ex} = 0{,}5$. Reactanța

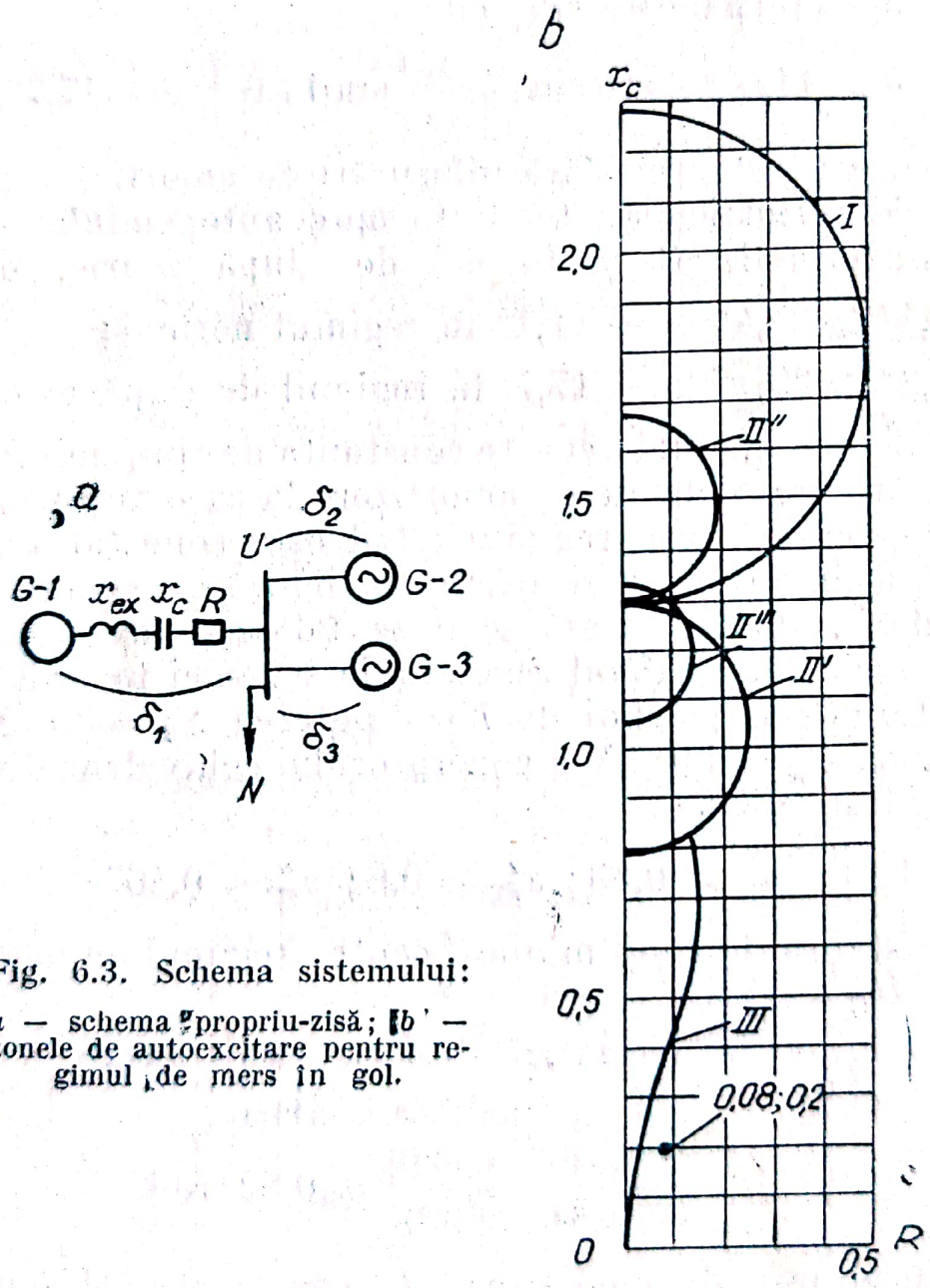


Fig. 6.3. Schema sistemului:
a — schema propriu-zisă; *b* — zonele de autoexcitare pentru regimul de mers în gol.

capacitivă de compensare este $x_C = 0{,}2$; rezistența liniei $R = 0{,}08$.

Parametrii generatoarelor se dau în tabelul 6.1 [1]).

Se găsesc zonele *I*, *II*, *III* de autoexcitare pentru regimul de mers în gol a tuturor mașinilor ($\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 0$). În acest caz se neglijează influența sarcinii, iar zonele *I* și *II* se determină aproximativ, fără a ține seama de procesele tranzitorii în circuitele statorului.

Zona *I* de autoexcitare sincronă se poate găsi cu determinantul caracteristic (4.23) care se aduce la forma (4.23 a) pentru schema cu trei centrale.

Se determină coeficienții ecuației (4.23 a):

$$A = 0{,}5 \cdot 0{,}338 + 0{,}5 \cdot 0{,}5 + 0{,}5 \cdot 0{,}5 + 0{,}5 \cdot 0{,}338 = 0{,}838;$$

$$B = -0{,}838(1{,}5 + 0{,}5 + 0{,}6 + 0{,}5) + 0{,}5 \cdot 0{,}5\,(0{,}338 + 0{,}5) + 0{,}338 \cdot 0{,}5\,(0{,}5 + 0{,}5) = -2{,}98;$$

$$D = 0{,}838(1{,}5 + 0{,}5)(0{,}6 + 0{,}5) + 0{,}5 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}338 \cdot 0{,}5 + 0{,}5 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}338(0{,}6 + 0{,}5) + 0{,}5 \cdot 0{,}338 \cdot 0{,}5(1{,}5 + 0{,}5) + 0{,}5 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}5\,(0{,}6 + 0{,}5) + 0{,}5 \cdot 0{,}338 \cdot 0{,}5(1{,}5 + 0{,}5) = 2{,}45$$

Tabelul 6.1

Parametrii \ Generatoarele	*G-1*	*G-2*	*G-3*
x_d	1,5	0,5	0,5
x_q	0,6	0,338	0,5
x'_d	0,2	0,169	0,1
x''_d	0,072	0,0724	0,06
x''_q	0,069	0,069	0,05
x_1	0,086	0,0862	0,065
T_{d0}	1 670	1 730	3 140
T_D	16,7	37,2	200
T_Q	16,7	31,3	300
σ_{dD}	0,382	0,382	0,3

[1]) Reactanțele externe au fost incluse în acest caz în reactanțele generatoarelor *G-1* și *G-2*.

Scanned with OKEN Scanner

Centrul cercului, corespunzător zonei I, este situat pe axa x_C la distanța

$$-\frac{B}{2A} = -\frac{-2,98}{2 \cdot 0,838} = 1,78$$

față de începutul axei de coordonate. Raza acestui cerc este (fig. 6.3, b)

$$\sqrt{\frac{B^2 - 4AD}{4A^2}} = \sqrt{\frac{2,98^2 - 4 \cdot 0,838 \cdot 2,45}{4 \cdot 0,838^2}} = 0,488.$$

Zona II a autoexcitării sincrone se determină pe porțiuni. Cu ajutorul relației (4.24 a) se găsește porțiunea din zonă, corespunzătoare supraconductivității înfășurărilor de excitație de la cele trei mașini ale schemei și care este reprezentată în fig. 6.3, a. Introducînd valorile cifrice în (6.24 a) și rezolvînd în raport cu x_C, se obține

$$x_{C1} = 1,284; \quad x_{C2} = 0,773.$$

Partea căutată a zonei, notată cu II' în fig. 6.3, a reprezintă un semicerc cu raza

$$\frac{1,284 - 0,773}{2} = 0,255,$$

avînd centrul pe axa x_C la distanța

$$\frac{1,284 + 0,773}{2} = 1,028,$$

față de începutul axelor de coordonate.

Partea din zona II, corespunzătoare ipotezei că una dintre mașini are înfășurarea de excitație supraconductoare, se găsește cu ecuația (4.25 a). În urma rezolvării acestei ecuații, se determină zona II'' (fig. 6.3,b) de rază 0,178, cu coordonatele centrului 0; 1,5.

Partea din zona autoexcitării asincrone, determinată în ipoteza a două circuite supraconductoare de excitație, se

găsește cu (4.26 a). Rezolvarea acestei ecuații dă posibilitatea să se obțină zona *II''* (fig. 6.3, *b*). Raza acestei zone este legată cu 0,14, iar coordonatele centrului sînt 0; 1,19.

Zona *III* de autoexcitare se găsește prin metoda frecvențelor folosind caracteristicile reprezentate în fig. 4.3 pentru generatorul *G-1*, în fig. 4.4 — pentru generatorul *G-2* și în fig. 6.4. — pentru generatorul *G-3*, în conformitate cu schema reprezentată în fig. 4.10. Aici au fost determinate zonele de autoexcitare ale schemei considerate pentru unul din regimuri și anume pentru regimul de mers în gol.

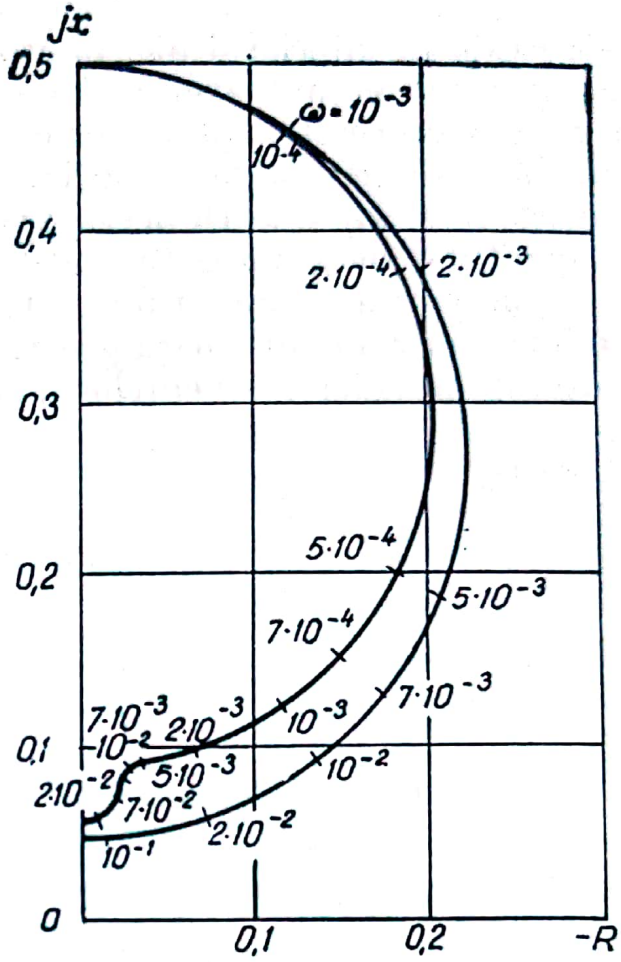


Fig. 6.4. Caracteristica de frecvență a turbogeneratorului *G-3*.

În cazul general este necesar să se efectueze calcule pentru mai multe regimuri și să găsim pe acela care va avea cele mai largi zone de autoexcitare. În cazul concret dat, variația regimului inițial al sistemului se reflectă în mică măsură asupra configurației zonei *III* și punctul, care determină valoarea x_C și R (fig. 6.3, *b*) se va găsi totdeauna în afara limitei acestei zone.

Autoexcitarea motoarelor asincrone. Zona fundamentală de autoexcitare a motoarelor asincrone în regimul stabilizat, se determină destul de exact cu relația (2.28). Aceeași expresie poate fi utilizată și pentru condițiile de pornire ale motorului. Luînd o serie de valori pentru viteza Ω se pot obține mai multe zone de autoexcitare și se determină poziția punctului cu coordonatele R și x_C care reprezintă parametrii schemei date referitor la aceste zone. Dacă punctul reprezentativ nu

se găsește în interiorul nici unei zone, evident că la pornire motorul nu se autoexcită. Expresia (2.28), obținută prin neglijarea proceselor tranzitorii în circuitul statorului motorului, dă posibilitatea să se obțină zona de autoexcitare între limitele $x' < x_C < x$. De aceea, pentru determinarea completă a condițiilor de autoexcitare atît în regimul staționar, cît și în cel de pornire a motorului, este necesar să se construiască suplimentar zona inferioară pentru $x_C < x'$. Ultima se face cu ajutorul metodei frecvențelor folosind expresia (2.29).

Scanned with OKEN Scanner

Anexe

Anexa 1

Coeficienții ecuației caracteristice (2.42)

$$a_0 = T_{d0} T_p T_e x_q x'_d;$$

$$a_1 = T_{d0}(T_p + T_e)\, x_q x'_d + T_p T_e x_q x_d + \Delta a_1;$$

$$a_2 = T_{d0} T_p T_e (x_C x'_d + x_q x_C + 2x_q x'_d) + T_{d0} x_q x'_d + \\ + (T_p + T_e)\, x_q x'_d + \Delta a_2;$$

$$a_3 = T_p T_e (x_C x_d + x_q x_C + 2x_q x_d) + T_{d0}(T_p + \\ + T_e)(x_C x'_d + x_q x_C + 2x_q x'_d) + x_q x_d + \Delta a_3;$$

$$a_4 = T_{d0} T_p T_e (x'_d - x_C)(x_q - x_C) + (T_p + T_e)(x_C x_d + \\ + x_q x_C + 2x_q x_d) + T_{d0}(x_C x'_d + x_q x_C + 2x_q x'_d) + \Delta a_4;$$

$$a_5 = T_{d0}(T_p + T_e)(x'_d - x_C)\,(x_q - x_C) + T_p T_e (x_d - \\ - x_C)\,(x_q - x_C) + x_C x_d + x_q x_C + 2x_q x_d + \Delta a_5;$$

$$a_6 = (T_p + T_e)\,(x_d - x_C)\,(x_q - x_C) + T_{d0}(x'_d - \\ - x_C)(x_q - x_C) + \Delta a_6;$$

$$a_7 = (x_d - x_C)(x_q - x_C) + \Delta a_7.$$

Variațiile $\Delta a_1 - \Delta a_7$ au următoarele expresii la reglarea după :

— abaterea de tensiune, prima și a doua derivată :

$$\Delta a_1 = K_{2U} x_q x_{ex};$$

$$\Delta a_2 = K_{1U} x_q x_{ex};$$

$$\Delta a_3 = K_{0U} x_q x_{ex} - K_{2U}(x_q x_C - 3x_C x_{ex} - 2x_q x_{ex});$$

Scanned with OKEN Scanner

$$\Delta a_4 = -K_{1U}(x_q x_C - 3x_C x_{ex} - 2x_q x_{ex});$$

$$\Delta a_5 = -K_{0U}(x_q x_C - 3x_C x_{ex} - 2x_q x_{ex}) + K_{2U}(x_q - x_C)(x_{ex} - x_C);$$

$$\Delta a_6 = K_{1U}(x_q - x_C)(x_{ex} - x_C);$$

$$\Delta a_7 = K_{0U}(x_q - x_C)(x_{ex} - x_C);$$

— abaterea de curent, derivata întîia și a doua :

$$\Delta a_1 = K_{2i} x_q;$$

$$\Delta a_2 = K_{1i} x_q;$$

$$\Delta a_3 = K_{0i} x_q + K_{2i}(x_C + 2x_q);$$

$$\Delta a_4 = K_{1i}(x_C + 2x_q);$$

$$\Delta a_5 = K_{0i}(x_C + 2x_q) + K_{2i}(x_q - x_C);$$

$$\Delta a_6 = K_{1i}(x_q - x_C);$$

$$\Delta a_7 = K_{0i}(x_q - x_C).$$

Anexa 2

Coeficienții ecuației caracteristice (3.14)

$$a_0 = T_J T_{d0} T_D T_Q \sigma_{dD} x''_{d\Sigma} x''_{q\Sigma};$$

$$a_1 = T_J[T_{d0} T_D T_Q \sigma_{dD} R(x''_{d\Sigma} + x''_{q\Sigma}) + T_{d0} T_Q x'_{d\Sigma} x''_{q\Sigma} + T_{d0} T_D \sigma_{dD} x''_{d\Sigma} x_{q\Sigma} + T_D T_Q x_{1\Sigma} x''_{q\Sigma}];$$

$$a_2 = T_J[T_{d0} T_D \sigma_{dD} R(x''_{d\Sigma} + x_{q\Sigma}) + T_{d0} T_Q R(x'_{d\Sigma} + x''_{q\Sigma}) + T_D T_Q R(x_{1\Sigma} + x''_{q\Sigma}) + T_{d0} T_D T_Q \sigma_{dD}(x''_{d\Sigma} x'_{q\Sigma} + R^2) + T_{d0} x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma} + T_D x_{1\Sigma} x_{q\Sigma} + T_Q x_{d\Sigma} x''_{q\Sigma}] + T_{d0} T_D T_Q \sigma_{dD}[\psi_{d0} x''_{d\Sigma}(\psi_{d0} - i_{d0} x''_{q\Sigma}) + \psi_{q0} x''_{q\Sigma}(\psi_{q0} - i_{q0} x''_{d\Sigma})];$$

$$a_3 = T_J\{T_{d0}T_D\sigma_{dD}(x''_{d\Sigma}\, x_{q\Sigma} + R^2) + T_{d0}T_Q(x'_{d\Sigma}x''_{q\Sigma} + R^2) +$$
$$+ T_D T_Q(x_{1\Sigma}x''_{q\Sigma} + R^2) + R[T_{d0}(x'_{d\Sigma} + x_{q\Sigma}) + T_D(x_{1\Sigma} +$$
$$+ x_{q\Sigma}) + T_Q(x_{d2} + x''_{q\Sigma})] + x_{d\Sigma}x_{q\Sigma}\} + T_{d0}T_D T_Q\sigma_{dD}[\psi_{d0} -$$
$$- i_{d0}x''_{q\Sigma})(x''_{d\Sigma}U \sin\delta_0 + R\psi_{d0} - x''_{d\Sigma}\psi_{q0}) + (\psi_{q0} -$$
$$- i_{q0}x''_{d\Sigma})\,(- x''_{d\Sigma}U \cos\delta_0 + x''_{q\Sigma}\psi_{d0} + R\psi_{q0})] +$$
$$+ T_{d0}T_D\sigma_{dD}[\psi_{d0}x''_{d\Sigma}(\psi_{d0} - i_{d0}x_{q\Sigma}) + \psi_{q0}x_{q\Sigma}(\psi_{q0} - i_{q0}x''_{d\Sigma})] +$$
$$+ T_{d0}T_Q[\psi_{d0}x'_{d\Sigma}(\psi_{d0} - i_{d0}x''_{q\Sigma}) + \psi_{q0}x''_{q\Sigma}(\psi_{q0} - i_{q0}x'_{d\Sigma})] +$$
$$+ T_D T_Q[x_{1\Sigma}\psi_{d0}(\psi_{d0} - i_{d0}x''_{q\Sigma}) + \psi_{q0}x''_{d\Sigma}(\psi_{q0} - i_{q0}x_{1\Sigma})];$$

$$a_4 = T_J[T_{d0}(x'_{d\Sigma}x_{q\Sigma} + R^2) + T_D[(x_{1\Sigma}x_{q\Sigma} + R^2) +$$
$$+ T_Q(x_{d\Sigma}x''_{q\Sigma} + R^2) + R(x_{d\Sigma} + x_{q\Sigma})] +$$
$$+ T_{d0}T_D T_Q\sigma_{dD}[(\psi_{d0} - i_{d0}x''_{q\Sigma})(RU \sin\delta_0 + x''_{d\Sigma}\, U \cos\delta_0) +$$
$$+ (\psi_{q0} - i_{q0}x''_{d\Sigma})(x''_{q\Sigma}\, U \sin\delta_0 - RU \cos\delta_0)] +$$
$$+ T_{d0}T_D\sigma_{dD}[(\psi_{q0} - i_{q0}x''_{q\Sigma})(x_{q\Sigma}\psi_{d0} + R\psi_{q0} - x_{q\Sigma}U \cos\delta_0 +$$
$$+ (\psi_{d0} - i_{d0}x_{q\Sigma})(- x''_{d\Sigma}\psi_{q0} + R\psi_{d0} + x''_{d\Sigma}\, U \sin\delta_0)] +$$
$$+ T_{d0}T_Q[(\psi_{q0} - i_{q0}x'_{d\Sigma})(\psi_{d0}x''_{q\Sigma} + R\psi_{q0} - x''_{q\Sigma}U \cos\delta_0) +$$
$$+ (\psi_{q0} - i_{d0}x''_{q\Sigma})(x'_{d\Sigma}\, U \sin\delta_0 + R\psi_{d0} - x'_{d\Sigma}\psi_{q0})] +$$
$$+ T_D T_Q[(\psi_{q0} - i_{q0}x'_{1\Sigma})(\psi_{d0}x''_{q\Sigma} + R\psi_{q0} - x''_{q\Sigma}U \cos\delta_0) +$$
$$+ (\psi_{d0} - i_{d0}x''_{q\Sigma})\,(x_{1\Sigma}U \sin\delta_0 + R\psi_{d0} - x_1\psi_{q0})] +$$
$$+ T_{d0}[(\psi_{d0} - i_{d0}x_{q\Sigma})x'_{d\Sigma}\psi_{d0} + (\psi_{q0} - i_{q0}x'_{d\Sigma})x_{q\Sigma}\psi_{q0}] +$$
$$+ T_D[(\psi_{d0} - i_{d0}x_{q\Sigma})x_{1\Sigma}\psi_{d0} + (\psi_{q0} - i_{q0}x_{1\Sigma})\;\; x_{q\Sigma}\psi_{q0}] +$$
$$+ T_Q[(\psi_{d0} - i_{d0}x''_{q\Sigma})x_{d\Sigma}\psi_{d0} + (\psi_{q0} - i_{q0}x_{d\Sigma})x''_{q\Sigma}\psi_{q0}];$$

Scanned with OKEN Scanner

$$a_5 = T_J(x_{d\Sigma}x_{q\Sigma} + R^2) + T_{d0}T_D\sigma_{dD}[(\psi_{d0} - i_{d0}x_{q\Sigma})(RU\sin\delta_0 +$$
$$+ x''_{d\Sigma}U\cos\delta_0) + (\psi_{q0} - i_{q0}x''_{d\Sigma})(x_{q\Sigma}U\sin\delta_0 - RU\cos\delta_0)] +$$
$$+ T_{d0}T_Q[(\psi_{d0} - i_{d0}x''_{q\Sigma})(RU\sin\delta_0 - x'_{d\Sigma}U\cos\delta_0) +$$
$$+ (\psi_{q0} - i_{q0}x'_{d\Sigma})(x''_{q\Sigma}U\sin\delta_0 - RU\cos\delta_0)] + T_DT_Q[(\psi_{d0} -$$
$$- i_{d0}x''_{q\Sigma})\ (RU\sin\delta_0 + x_{1\Sigma}U\cos\delta_0) + (\psi_{q0} -$$
$$i_{q0}x_{1\Sigma})\ (x''_{q\Sigma}U\sin\delta_0 - RU\cos\delta_0)] + T_{d0}[(\psi_{d0} -$$
$$- i_{d0}x_{q\Sigma})(x'_{d\Sigma}U\sin\delta_0 + R\psi_{d0} - x'_{d\Sigma}\psi_{q0}) + (\psi_{q0} -$$
$$- i_{q0}x'_{d\Sigma})(x_{q\Sigma}\psi_{d0} - x_{q\Sigma}U\cos\delta_0 + R\psi_{q0})] + T_D[(\psi_{d0} -$$
$$- i_{d0}x_{q\Sigma})(x_{1\Sigma}U\sin\delta_0 - x_{1\Sigma}\psi_{q0} + R\psi_{d0}) + (\psi_{q0} -$$
$$- i_{q0}x_{1\Sigma})(x_{q\Sigma}\psi_{d0} - x_{q\Sigma}U\cos\delta_0 + R\psi_{q0})] + T_Q[(\psi_{d0} -$$
$$- i_{d0}x''_{q\Sigma})(x_{d\Sigma}U\sin\delta_0 - x_{d\Sigma}\psi_{q0} + R\psi_{d0}) + (\psi_{q0} -$$
$$- i_{q0}x_{d\Sigma})(x''_{q\Sigma}\psi_{d0} - x''_{q\Sigma}U\cos\delta_0 + R\psi_{q0})] + (\psi_{d0} -$$
$$- i_{d0}x_{q\Sigma})x_{d\Sigma}\psi_{d0} + (\psi_{q0} - i_{q0}x_{d\Sigma})x_{q\Sigma}\psi_{q0};$$

$$a_6 = T_{d0}[(\psi_{d0} - i_{d0}x_{q\Sigma})(RU\sin\delta_0 + x'_{d\Sigma}U\cos\delta_0) + (\psi_{q0} -$$
$$- i_{q0}x_{d\Sigma})(x_{q\Sigma}U\sin\delta_0 - RU\cos\delta_0)] + T_D[(\psi_{d0} - i_{d0}x_{q\Sigma}) \times$$
$$\times (RU\sin\delta_0 + x_{1\Sigma}U\cos\delta_0) + (\psi_{q0} - i_{q0}x_{1\Sigma})(x_{q\Sigma}U\sin\delta_0 -$$
$$- RU\cos\delta_0)] + T_Q[(\psi_{d0} - i_{d0}x''_{q\Sigma})(RU\sin\delta_0 + x_{d\Sigma}U\cos\delta_0) +$$
$$+ (\psi_{q0} - i_{q0}x_{d\Sigma})(x''_{q\Sigma}U\sin\delta_0 - RU\cos\delta_0)] + (\psi_{d0} -$$
$$- i_{d0}x_{q\Sigma})(x_{d\Sigma}U\sin\delta_0 + R\psi_{d0} - x_{d\Sigma}\psi_{q0}) + (\psi_{q0} - i_{q0}x_{d\Sigma}) \times$$
$$\times (x_{q\Sigma}\psi_{d0} - x_{q\Sigma}U\cos\delta_0 + R\psi_{q0});$$

$$a_7 = (\psi_{d0} - i_{d0}x_{q\Sigma})(RU\sin\delta_0 + x_{d\Sigma}U\cos\delta_0) + (\psi_{q0} -$$
$$- i_{q0}x_{d\Sigma})(x_{q\Sigma}U\sin\delta_0 - RU\cos\delta_0).$$

Scanned with OKEN Scanner

Mărimile care intră în tabelul 3.2

$$P'_{Ed} = \left(\frac{\partial P}{\partial Ed}\right)_\delta = \left(\frac{\partial P}{\partial E_q}\right)_\delta \left(\frac{\partial E_q}{\partial E_d}\right)_\delta =$$

$$= \frac{z_{q\Sigma}}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma} + R^2}[2E_q \sin \alpha_{11Q} + U \sin (\delta - \alpha_{11Q})];$$

$$P'_{Ed} = \left(\frac{\partial P}{\partial E'_d}\right)_\delta = \left(\frac{\partial P}{\partial E_q}\right)_\delta \left(\frac{\partial E_q}{\partial E'_q}\right)_\delta =$$

$$= \frac{z_{q\Sigma}}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma} + R^2} [2E_q \sin \alpha_{11Q} + U \sin (\delta - \alpha_{11Q})];$$

$$P'_{UGd} = \left(\frac{\partial P}{\partial E'_d}\right)_\delta = \left(\frac{\partial P}{\partial E_q}\right)_\delta \left(\frac{\partial E_q}{\partial U_{Gd}}\right)_\delta =$$

$$= \frac{z_{q\Sigma}}{x_{ex} x_{q\Sigma} + R^2} [2E_q \sin \alpha_{11Q} + U \sin (\delta - \alpha_{11Q})].$$

Indicii E_d, E_q, E'_d, U_{Gd}, δ arată că respectivile mărimi se mențin neschimbate la diferențiere:

$$I'_d\delta = \left(\frac{\partial I_d}{\partial \delta}\right)_{Ed} = \frac{z_{q\Sigma}}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma} + R^2} U \sin (\delta - \alpha_{11Q});$$

$$I'_{dEd} = \left(\frac{\partial I_d}{\partial E_d}\right)_\delta = \frac{x_{q\Sigma}}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma} + R^2}.$$

Ținînd seama de $I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$, avem:

$$I'_\delta = \left(\frac{\partial I}{\partial \delta}\right)_{Ed} = \frac{1}{I}\left[I_d \left(\frac{\partial I_d}{\partial \delta}\right)_{Ed} + \left(\frac{\partial I_q}{\partial \delta}\right)_{Ed}\right] =$$

$$= \frac{U}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma} + R^2}\left[\frac{I_d}{I}\sqrt{x_{q\Sigma}^2 + R^2} \sin (\delta - \alpha_{11Q}) + \right.$$

$$\left. + \frac{I_q}{I}\sqrt{x_{d\Sigma}^2 + R^2} \cos (\delta - \alpha_{11G})\right];$$

$$I_{Ed} = \left(\frac{\partial I}{\partial E_d}\right)_\delta = \frac{1}{I} I_d \left(\frac{\partial I_d}{\partial E_d}\right)_\delta + I_q \left(\frac{\partial I_q}{\partial E_d}\right)_\delta \Bigg] =$$

$$= \frac{I_d x_{q\Sigma} + x_{q\Sigma} R}{I(x_{d\Sigma} x_{q\Sigma} + R^2)}.$$

Scanned with OKEN Scanner

Relația între unghiul intern δ_G și unghiul total δ exprimată prin parametri este :

$$\delta = \text{arc ctg} \frac{K \cos(\delta_l + \alpha - \alpha_{ex}) - 1}{K \sin(\delta_l + \alpha - \alpha_{ex})} + \alpha_{ex}$$

$$\delta_G = \text{arc sin} \left[\frac{1}{K} \sin(\delta - \alpha_{ex}) \right] + \alpha,$$

$$K = \frac{\sqrt{(x_q R)^2 + (x_{ex} x_{q\Sigma} + R^2)^2}}{z_{ex} x_q} \cdot \frac{U_G}{U},$$

$$\alpha = \text{arc tg} \frac{x_q R}{x_{ex} x_{q\Sigma} + R^2}, \quad \alpha_{ex} = \text{arc tg} \frac{R}{x_{ex}},$$

$$z_{ex} = \sqrt{x_{ex}^2 + R^2}.$$

Anexa 4

Deducerea ecuației caracteristice pentru sistemul format din două centrale (fig. 4.2)

Ecuațiile care caracterizează procesul tranzitoriu în generatorul *G-1*, reactanță și capacitate sînt :

$$pU_d + U_q = -[(p^2 - 1)x_{d1}(p) + R_p + x_C] - [2px_{q1}(p) + R]\, i_q - (p^2 - 1)G_1(p)U_{fd},$$

$$-U_d + pU_q = [2px_{d1}(p) + R]\, i_d - [(p^2 - 1)x_{q1}(p) + R_p + x_C]\, i_q + 2G_1(p)U_{fd1}.$$

Ecuațiile pentru generatorul *G-2*, scrise în sistemul de axe de coordonate *d*, *q* legat rigid de rotorul mașinii *G-2*:

$$U'_d = px_{d2}(p)i'_d + x_{q2}(p)i'_q + pG_2(p)U_{fd2},$$

$$U'_q = -x_{d2}(p)i'_d + px_{q2}(p)\, i'_q - G_2(p)U_{fd2}.$$

Relațiile de legătură între coordonatele lui *G-1* și *G-2* sînt :

$$U'_d = U_d \cos\delta + U_q \sin\delta, \quad U'_q = -U_d \sin\delta + U_q \cos\delta,$$

$$i'_d = i_d \cos\delta + i_q \sin\delta, \quad i'_q = -i_d \sin\delta + i_q \cos\delta.$$

Scanned with OKEN Scanner

După transformări, obținem ecuațiile Park-Gorev pentru generatorul *G-2*, raportate la sistemul de axe de coordonate *d*, *q*, ale generatorului *G-1.* :

$$U_d = \{p[x_{d2}(p)\cos^2\delta + x_{q2}(p)\sin^2\delta][x_{d2}(p) - x_{q2}(p)\sin\delta \times$$
$$\times \cos\delta\} i_d + \{[x_{d2}(p)\sin^2\delta + x_{q2}(p)\cos^2\delta] + p[x_{d2}(p) -$$
$$- x_{q2}(p)\sin\delta\cos\delta\} i_q + G_2(p)[\cos\delta p + \sin\delta] U_{fd2};$$
$$U_q = \{-[x_{d2}(p)\cos^2\delta + x_{q2}(p)\sin^2\delta] + p[x_{d2}(p) -$$
$$- x_{q2}(p)]\cos\delta\sin\delta\} i_d + \{p[x_{d2}(p)\sin^2\delta + x_{q2}(p)\cos^2\delta] -$$
$$- [x_{d2}(p) - x_{q2}(p)]\sin\delta\cos\delta\} i_q + G_2(p)[\sin\delta p -$$
$$- \cos\delta] U_{fd2}.$$

Rezolvînd împreună ecuațiile pentru generatoarele *G-1* și *G-2* obținem ecuațiile caracteristice (4.13).

Ecuația caracteristică simplificată a sistemului din fig. 4.2 fără considerarea proceselor tranzitorii în statorul generatoarelor

Ecuațiile generatoarelor primei centrale *G-1* sînt :

$$U_d = -Ri_d - [x_q(p) - x_C] i_q,$$
$$U_q = [x_{d1}(p) - x_C] i_d - Ri_q + G_1(p) U_{fd}.$$

Ecuațiile pentru generatoarele *G-2* (scrise în sistemul de axe de coordonate *d*, *q* al primei centrale *G-1*);

$$U_d = \frac{1}{2}[x_{d2}(p) - x_{q2}(p)]\sin 2\delta i_d + [x_{d2}(p)\sin^2\delta +$$
$$+ x_{q2}(p)\cos^2\delta] + G_2(p) U_{fd2}\sin\delta,$$
$$U_q = -[x_{d2}(p)\cos^2\delta + x_{q2}(p)\sin^2\delta] i_d - \frac{1}{2}[x_{d2}(p) -$$
$$- x_{q2}(p)]\sin 2\delta i_q - G_2(p) U_{fd2}\cos\delta.$$

Ecuația caracteristică este :

$$a_4' p^2 + a_5' p + a_6 = 0.$$

(gradul ecuației caracteristice este egal cu suma înfășurărilor situate pe rotoarele mașinilor electrice, necuplate electrice între ele; în cazul dat ele sînt două).

Scanned with OKEN Scanner

Sistemul electric complex

Considerînd că pe rotorul fiecărui generator există numai înfăşurarea de excitaţie, obţinem ecuaţia caracteristică simplificată de forma:

$$a'_8 p^3 + a'_9 p^2 + a'_{10} p + a'_{11} = 0,$$

unde

$$a'_8 = T_{d10} T_{d20} T_{d30} \{[(x'_{d1} - x_C)(x_{q1} - x_C) + R^2][x'_{d2} x_{q2} + x'_{d3} x_{q3} + (x'_{d2} x'_{d3} + x_{q2} x_{q3}) \sin^2 (\delta_2 - \delta_3) + (x'_{d2} x_{q3} + x'_{d3} x_{q2}) \cos^2 (\delta_2 - \delta_3)] + x'_{d2} x'_{d3} x_{q2} x_{q3} + (x'_{d1} - x_C)[x'_{d2} x'_{d3} x_{q2} \sin^2 \delta_3 + x'_{d2} x_{q2} x_{q3} \cos^2 \delta_3 + x'_{d2} x'_{d3} x_{q3} \sin^2 \delta_2 + x'_{d3} x_{q2} x_{q3} \cos^2 \delta_2] + (x_{q1} - x_C)[x'_{d2} x'_{d3} x_{q2} \cos^2 \delta_3 + x'_{d2} x_{q2} x_{q3} \sin^2 \delta_3 + x'_{d2} x'_{d3} x_{q3} \cos^2 \delta_2 + x'_{d3} x_{q2} x_{q3} \sin^2 \delta_2]\};$$

$$a'_9 = T_{d10} T_{d20} \{[(x'_{d1} - x_C)(x_{q1} - x_C) + R^2][x'_{d2} x_{q2} + x_{d3} x_{q3} + (x'_{d2} x_{d3} + x_{q2} x_{q3}) \sin^2 (\delta_2 - \delta_3) + (x'_{d2} x_{q3} + x_{d3} x_{q2}) \times \cos^2 (\delta_2 - \delta_3)] + x'_{d2} x_{d3} x_{q2} x_{q3} + (x'_{d1} - x_C)[x'_{d2} x_{d3} x_{q2} \sin^2 \delta_3 + x'_{d2} x_{q2} x_{q3} \cos^2 \delta_3 + x'_{d2} x_{d3} x_{q3} \sin^2 \delta_2 + x_{d3} x_{q2} x_{q3} \cos^2 \delta_2] + (x_{q1} - x_C)[x'_{d2} x_{d3} x_{q2} \cos^2 \delta_3 + x'_{d2} x_{q2} x_{q3} \sin^2 \delta_3 + x'_{d2} x_{d3} x_{q3} \cos^2 \delta_2 + x_{d3} x_{q2} x_{q3} \sin^2 \delta_2)\} + T_{d10} T_{d20} \{[(x'_{d1} - x_C)(x_{q1} - x_C) + R^2][x_{d2} x_{q2} + x'_{d3} x_{q3} + (x_{d2} x'_{d3} + x_{q2} x_{q3}) \sin (\delta_2 - \delta_3) + (x_{d2} x_{q3} + x'_{d3} x_{q2}) \cos^2 (\delta_2 - \delta_3)] + x_{d2} x'_{d3} x_{q2} x_{q3} + (x'_{d1} - x_C)[x_{d2} x'_{d3} x_{q2} \sin^2 \delta_3 + x_{d2} x_{q2} x_{q3} \cos^2 \delta_3 + x_{d2} x'_{d3} x_{q3} \sin^2 \delta_2 + x'_{d2} x_{q2} x_{q3} \cos^2 \delta_2] +$$

$$+ (x_{q1} - x_C)[x_{d2}x'_{d3}x_{q2}\cos^2\delta_3 + x_{d2}x_{q2}x_{q3}\sin^2\delta_3 +$$
$$+ x_{d2}x'_{d3}x_{q3}\cos^2\delta_3 + x'_{d3}x_{q2}x_{q3}\sin^2\delta_2]\} + T_{d20}T_{d30}\{[(x_{d1} -$$
$$- x_C)(x_{q1} - x_C) + R^2][x'_{d2}x_{q2} + x'_{d3}x_{q3} + (x'_{d2}x'_{d3} +$$
$$+ x_{q2}x_{q3})\sin^2(\delta_2 - \delta_3) + (x'_{d2}x_{q3} + x'_{d3}x_{q2})\cos^2(\delta_2 - \delta_3)] +$$
$$+ x'_{d2}x'_{d3}x_{q2}x_{q3} + (x_{d1} - x_C)[x'_{d2}x'_{d3}x_{q2}\sin^2\delta_3 +$$
$$+ x'_{d2}x_{q2}x_{q3}\cos^2\delta_3 + x'_{d2}x'_{d3}x_{q3}\sin^2\delta_2 + x'_{d3}x_{q2}x_{q3}\cos^2\delta_2] +$$
$$+ (x_{q1} - x_C)[x'_{d2}x'_{d3}x_{q2}\cos^2\delta_3 + x'_{d2}x_{q2}x_{q3}\sin^2\delta_3 +$$
$$+ x'_{d2}x'_{d3}x_{q3}\cos^2\delta_2 + x'_{d3}x_{q2}x_{q3}\sin^2\delta_2]\};$$

$$a'_{10} = T_{d10}\{[(x'_{d1} - x_C)(x_{q1} - x_C) + R^2][x_{d2}x_{q2} + x_{d3}x_{q3} +$$
$$+ (x_{d2}x_{d3} + x_{q2}x_{q3})\sin^2(\delta_2 - \delta_3) + (x_{d2}x_{q3} + x_{d3}x_{q2}) \times$$
$$\times \cos^2(\delta_2 - \delta_3)] + x_{d2}x_{d3}x_{q2}x_{q3} + (x'_{d1} - x_C)[x_{d2}x_{d3} \times$$
$$\times x_{q2}\sin^2\delta_3 + x_{d2}x_{q2}x_{q3}\cos^2\delta_3 + x_{d2}x_{d3}x_{q3}\sin^2\delta_2 +$$
$$+ x_{d3}x_{q2}x_{q3}\cos^2\delta_2] + (x_{q1} - x_C)[x_{d2}x_{d3}x_{q2}\cos^2\delta_3 +$$
$$+ x_{d2}x_{q2}x_{q3}\sin^2\delta_3 + x_{d2}x_{d3}x_{q3}\cos^2\delta_2 + x_{d3}x_{q2}x_{q3}\sin^2\delta_2]\} +$$
$$+ T_{d20}\{[(x_{d1} - x_C)(x_{q1} - x_C) + R^2][x'_{d2}x_{q2} + x_{d3}x_{q3} +$$
$$+ (x'_{d2}x_{d3} + x_{q2}x_{q3})\sin^2(\delta_2 - \delta_3) + (x'_{d2}x_{q3} + x_{d3}x_{q2})\cos^2(\delta_2 -$$
$$- \delta_3)] + x'_{d2}x_{d3}x_{q2}x_{q3} + (x_{d1} - x_C)[x'_{d2}x_{d3}x_{q2}\sin^2\delta_3 +$$
$$+ x'_{d2}x_{q2}x_{q3}\cos^2\delta_3 + x'_{d2}x_{d3}x_{q3}\sin^2\delta_2 + x_{d3}x_{q2}x_{q3}\cos^2\delta_2] +$$
$$+ (x_{q1} - x_C)[x'_{d2}x_{d3}x_{q2}\cos^2\delta_3 + x'_{d2}x_{q2}x_{q3}\sin^2\delta_3 +$$
$$+ x'_{d2}x_{d3}x_{q3}\cos^2\delta_2 + x_{d3}x_{q2}x_{q3}\sin^2\delta_2]\} + T_{d30}\{[(x_{d1} - x_C) +$$
$$+ (x_{q1} - x_C) + R^2][x_{d2}x_{q2} + x'_{d3}x_{q3} + (x_{d2}x'_{d3} +$$
$$+ x_{q2}x_{q3})\sin^2(\delta_2 - \delta_3) + (x_{d2}x_{q3} + x'_{d3}x_{q2})\cos^2(\delta_2 - \delta_3)] +$$
$$+ x_{d2}x'_{d3}x_{q2}x_{q3} + (x_{d1} - x_C)[x_{d2}x'_{d3}x_{q2}\sin^2\delta_3 +$$
$$+ x_{d2}x_{q2}x_{q3}\cos^2\delta_3 + x_{d2}x'_{d3}x_{q3}\sin^2\delta_2 + x'_{d3}x_{q2}x_{q3}\cos^2\delta_2] +$$
$$+ (x_{q1} - x_C)[x_{d2}x'_{d3}x_{q2}\cos^2\delta_3 + x_{d2}x_{q2}x_{q3}\sin^2\delta_3 +$$
$$+ x_{d2}x'_{d3}x_{q3}\cos^2\delta_2 + x'_{d3}x_{q2}x_{q3}\sin^2\delta_2]\};$$

Scanned with OKEN Scanner

$$a'_{11} = [(x_{d1} - x_C)(x_{q1} - x_C) + R^2][x_{d2}x_{q2} + x_{d3}x_{q3} +$$
$$+ (x_{d2}x_{d3} + x_{q2}x_{q3})\sin^2(\delta_2 - \delta_3) + (x_{d2}x_{q3} +$$
$$+ x_{d3}x_{q2})\cos^2(\delta_2 - \delta_3)] + x_{d2}x_{d3}x_{q2}x_{q3} + (x_{d1} -$$
$$- x_C)[x_{d2}x_{d3}x_{q2}\sin^2\delta_3 + x_{d2}x_{q2}x_{q3}\cos^2\delta_3 + x_{d2}x_{d3}x_{q3}\sin^2\delta_2 +$$
$$+ x_{d3}x_{q2}x_{q3}\cos^2\delta_2] + (x_{q1} - x_C)[x_{d2}x_{d3}x_{q2}\cos^2\delta_3 +$$
$$+ x_{d2}x_{q2}x_{q3}\sin^2\delta_3 + x_{d2}x_{d3}x_{q3}\cos^2\delta_2 + x_{d3}x_{q2}x_{q3}\sin^2\delta_2].$$

Anexa 6

Ecuațiile Park-Gorev care caracterizează procesul tranzitoriu din mașina de ordin k ce funcționează în paralel cu alte n-1 mașini în centrală

$$-p\psi_{dk} - \psi_{qk}p\gamma_k - Ri_{dk} = U_{Gd(k)},$$
$$-p\psi_{qk} + \psi_{dk}p\gamma_k - Ri_{qk} = U_{Gq(k)},$$
$$\psi_{dk} = x_d(p)i_{dk} + G(p)U_{fd(k)},$$
$$\psi_{qk} = x_q(p)\, i_{qk},$$
$$T_J p^2\gamma_k = M_{mec} - (i_{qk}\psi_{dk} - i_{dk}\psi_{qk}),$$
$$p\gamma_k = 1 + p\delta_k.$$

Indicele k în ecuațiile sistemului arată că sistemul de axe de coordonate al mașinii, k este rigid legat de rotorul mașini date.

Anexa 7

Coeficienții ecuației (5.6)

$$a = 2px_d(p) + R + R_{ex} + 2px_{ex},$$
$$b = R_{ex} + 2px_{ex};$$
$$c = -\{(p^2 - 1)x_q(p) + (R + R_{ex})p + [x_C + (p^2 - 1)x_{ex}]\},$$

$$d = -[x_C + R_{ex}p + (p^2 - 1)\, x_{ex}],$$

$$e = (p^2 - 1)x_d(p) + (R + R_{ex})p + [x_C + (p^2 - 1)\, x_{ex}],$$

$$f = x_C + R_{ex}p + (p^2 - 1)\, x_{ex},$$

$$g = 2px_q(p) + R + R_{ex} + 2px_{ex},$$

$$h = R_{ex} + 2px_{ex},$$

$$l = \frac{1}{n}\left\{i_{q0}(R_{ex} + 2px_{ex}) + i_{d0}[x_C + R_{ex}p + (p^2 - 1)x_{ex}]\right\},$$

$$m = \frac{\psi_p}{n}\, p + \psi'_{d0}p^2 + \frac{1}{n}[2x_{ex}p - (n - 1)R_{ex}]i_{q0} +$$

$$+ \frac{1}{n}[x_{ex}p^2 + R_{ex}p - (n - 1)(x_C - x_{ex})]i_{d0} - U_{Gd0}p - U\cos\delta_0,$$

$$w = \frac{1}{n}\{-i_{d0}(R_{ex} + 2px_{ex}) + i_{q0}[x_C + R_{ex}\, p + x_{ex}(p^2 - 1)]\},$$

$$s = \frac{\psi_{q0}}{n}\, p^2 - \psi'_{d0}p + \frac{1}{n}[(n - 1)R_{ex} - 2x_{ex}p]\, i_{d0} +$$

$$+ \frac{1}{n}[R_{ex}p + x_{ex}\, p^2 - (n - 1)(x_C - x_{ex})]\, i_{q0} - U_{Gq0}p -$$

$$- U\sin\delta_0,$$

$$A = \frac{1}{n}[i_{q0}x_d(p) - \psi_{q0}]; \quad B = \frac{1}{n}[n\psi'_{d0} - i_{d0}x_q(p)],$$

$$F = T_J p^2.$$

Anexa 8

Considerarea reglajului automat al excitației

În cazul cînd pe generatoare se montează dispozitive de reglaj automat al excitației, la coeficienții scriși în anexa 6 trebuie să se facă unele corecturi ce depind de tipul regulatorului de excitație:

— în cazul cînd reglajul excitației se face în funcție de parametrul global la toate generatoarele :

$$\Delta a = \Delta b = 2\frac{i_{d0}}{i_0} pG(p)W(p); \quad \Delta c = \Delta d = 2\frac{i_{q0}}{i_0} pG(p)W(p);$$

$$\Delta e = \Delta f = (p^2 - 1)\frac{i_{d0}}{i_0} G(p)W(p); \quad \Delta g = \Delta h =$$

$$= (p^2 - 1)\frac{i_{q0}}{i_0} G(p)W(p);$$

$$\Delta l = \Delta m = \Delta w = \Delta s = 0; \quad \Delta A = \frac{1}{n} i_{q0} \frac{i_{d0}}{i_0} G(p)W(p);$$

$$\Delta B = \frac{1}{n} i_{q0} \frac{i_{q0}}{i_0} G(p)W(p);$$

$$\Delta F = 0;$$

$$K = \frac{1}{n} i_{q0} \frac{i_{d0}}{i_0} G(p)W(p);$$

$$L = \frac{1}{n} i_{q0} \frac{i_{q0}}{i_0} G(p)W(p);$$

— la reglajul excitației în funcție de parametrii individuali :

$$\Delta a = 2p\frac{i_{d0}}{i_0} G(p)W(p); \quad \Delta b = 0; \quad \Delta c = 2p\frac{i_{q0}}{i_0} G(p)W(p);$$

$$\Delta d = 0; \quad \Delta e = (p^2 - 1)\frac{i_{d0}}{i_0} G(p)W(p); \quad \Delta f = 0;$$

$$\Delta g = (p^2 - 1)\frac{i_{q0}}{i_0} G(p)W(p);$$

$$\Delta h = \Delta l = \Delta m = \Delta w = \Delta s = 0;$$

$$\Delta A = \frac{1}{n} i_{q0} \frac{i_{d0}}{i_0} G(p)W(p); \quad \Delta B = \frac{1}{n} i_{q0} \frac{i_{q0}}{i_0} G(p)W(p);$$

$$\Delta F = 0;$$

Scanned with OKEN Scanner

Coeficienţii ecuaţiei caracteristice (5.26)

$$a_0 = T_{Je} T_{d10} T_{Q2} (x'_{d1} + x'_{d2})(x'_{q1} + x''_{q2}),$$

$$a_1 = T_{Je}\{T_{d10} T_{d20} T_{Q2} R(x'_{d1} + x'_{d2} + x_{q1} + x''_{q2}) +$$
$$+ T_{d10} T_{d20}(x'_{d1} + x'_{d2})(x_{q1} + x''_{q2}) + T_{d10} T_{Q2}(x'_{d1} +$$
$$+ x_{d2})(x_{q1} + x''_{q2}) + T_{d20} T_{Q2} (x_{d1} + x'_{d2})(x_{q1} + x''_{q2})\},$$

$$a_2 = T_{Je}\{T_{d10} T_{d20} T_{Q2} [(x'_{d1} + x'_{d2})(x_{q1} + x''_{q2}) + R^2] +$$
$$+ T_{d10} T_{d20} R (x'_{d1} + x'_{d2} + x_{q1} + x_{q2}) + T_{d10} T_{Q2} R (x'_{d1} +$$
$$+ x_{d2} + x_{q1} + x''_{q2} + T_{d20} T_{Q2} R (x_{d1} + x'_{d2} + x_{q1} + x''_{q2}) +$$
$$+ T_{d10}(x'_{d1} + x_{d2})(x_{q1} + x_{q2}) + T_{d20}(x_{d1} + x'_{d2})(x_{q1} + x_{q2}) +$$
$$+ T_{Q2}(x_{d1} + x_{d2})(x_{q1} + x''_{q2}) + T_{d10} T_{d20} T_{Q2}(x'_{d1} + x'_{d2}),$$

$$a_3 = T_{Je}\{T_{d10} T_{d20}[(x'_{d1} + x'_{d2})(x_{q1} + x_{q2}) + R^2] +$$
$$+ T_{d10} T_{Q2} [(x'_{d1} + x_{d2})(x_{q1} + x''_{q2}) + R^2] + T_{d20} T_{Q2}[(x_{d1} +$$
$$+ x'_{d2})(x_{q1} + x''_{q2}) + R^2] + T_{d0} R (x'_{d1} + x_{d2} + x_{q1} + x_{q2}) +$$
$$+ T_{d20} R(x_{d1} + x'_{d2} + x_{q1} + x_{q2}) + T_{Q2} R(x_{d1} + x_{d2} + x_{q1} +$$
$$+ x''_{q2}) + (x_{d1} + x_{d2})(x_{q1} + x_{q2})\} + (x'_{d1} + x'_{d2}) T_{d10} T_{d20} +$$
$$+ T_{d10} T_{Q2}(x'_{d1} + x_{d2}) + T_{d20} T_{Q2} (x_{d1} + x'_{d2}) +$$
$$+ R T_{d10} T_{d20} T_{Q2};$$

$$a_4 = T_{Je}\{T_{d10} [(x'_{d1} + x_{d2})(x_{q1} + x_{q2}) + R^2] + T_{d20}[(x_{d1} +$$
$$+ x'_{d2})(x_{q1} + x_{q2}) + R^2) + T_{Q2}[(x_{d1} + x_{d2})(x_{q1} + x''_{q2}) +$$
$$+ R^2] + R(x_{d1} + x_{d2} + x_{q1} + x_{q2})\} + T_{d10}(x'_{d1} + x_{d2}) +$$
$$+ T_{d20}(x_{d1} + x'_{d2}) + T_{Q2}(x_{d1} + x_{d2}) + T_{d10} T_{d20} T_{Q2}(x'_{d1} +$$
$$+ x'_{d2}) + R(T_{d10} T_{d20} + T_{d10} T_{Q2} + T_{d20} T_{Q2}),$$

Scanned with OKEN Scanner

$$a_5 = T_{Je}[(x_{d1} + x_{d2})(x_{q1} + x_{q2}) + R^2] + T_{d10}T_{d20}(x'_{d1} +$$
$$+ x'_{d2}) + T_{d10}T_{Q2}(x'_{d1} + x_{d2}) + T_{d20}\,T_{Q2}(x_{d1} + x'_{d2}) +$$
$$+ R(T_{d10} + T_{d20} + T_{Q2}) + (x_{d1} + x_{d2}),$$
$$a_6 = T_{d10}(x'_{d1} + x'_{d2}) + T_{d20}(x_{d1} + x'_{d2}) +$$
$$+ T_{Q2}(x_{d1} + x_{d2}) + R,$$
$$a_7 = x_{d1} + x_{d2},$$
$$T_{Je} = \frac{T_{j1}\,T_{j2}}{T_{j1}\,T_{j2}}.$$

Scanned with OKEN Scanner

Bibliografie [1])

1. Venikov, V. A. *Perehodnie elektromehaniceskie proțesi.* Moskva-Leningrad, Gosenergoizdat, 1958.
2. Venikov, V. A., Jukov, L. A., Anisimova, N. D. *Holostîie rejimî dalnih elektroperedaci.* În: Elektricestvo, nr. 7, 1953.
3. Venikov, V. A. *Dalnîie elektroperedaci.* Moskva-Leningrad, Gosenergoizdat, 1960.
4. Dolghinov, A. I. *Rezonans v elektriceskih țepiah i sistemah.* Moskva-Leningrad. Gosenergoizdat, 1957.
5. Şcedrin, N. N. *K voprosu o samovozbujdenii sinhronnîh i asinhronnîh mașin.* În: Trudî Uz. ni-ta energetiki, nr. 11, 1958.
6. Anisimov, S. N. *Iavlenie samoraskacivania rotora sinhronnii mașin.* În: Trudî LPI, nr. 3, 1948.
7. Gorev, A. A. *Perehodnie proțesî sinhronoi mașinî.* Moskva-Leningrad, Gosenergoizdat, 1950.
8. Venikov, V. A. u. gp. *Perehodnîie proțesî elektriceskih sistem v primerah i ilustrațiah.* Moskva-Leningrad, Gosenergoizdat, 1962.
9. Fedorov, D. A. *Regulirovanie vozbujdenia compensirovanovo emkostiu sinhronovo kompensatora, rabotaiușcevo v usloviah samovozbujdenia.* În: Trud MEI, nr. 20, 1956.
10. Fedorov, D. A. *Uslovia samovozbujdenia iavnopoliusnoi sinhronoi mașinî, imeiușcei prodolno-poperecinuiu uspokoitelnuiu obmotki.* În: Trudî MEI, nr. 20, 1956.
11. Poliak, N. A. *Injenernîi metod rasceota zon asinhronovo samovozbujdenia elektriceskoi mașinî.* În: Elektricestvo, nr. 11, 1956.
12. Venikov, V. A., Fedorov, D. A. *Primenenie kompensirovanîh sinhronîh kompensatorov v electriceskih sistemah.* În: Trudî MEI, nr. 26, 1957.
13. Fedorov, D. A. *Vlianie vozbujdenia na haracter asinhronovo samovozbujdenia sinhronoi mașinî.* În: Trudî MEI, nr. 26, 1957.
14. Dolghinov, A. I., Fedorov, D. A. *Issledovanie samovozbujdenia v tipovîh shemah elektroperedaci.* În: Naucinîie dokladî vișșei școlî-Energhetika, nr. 3, 1958.
15. Dolghinov, A. I. *K teorii parametriceskovo samovozbujdenia elektriceskih mașin.* În: Elektricestvo, nr. 12, 1955.

---

[1]) Prezenta enumerare nu are pretenția că epuizează toate *problemele* bibliografice.

Scanned with OKEN Scanner

16. Şcedrin, N. N. *Prosteişie istolkovania iavlenia parametriceskovo samoraskacivania sinhronnoi maşinî, soedinennoi s şinami postoiannovo napriajenia i postoiannoi ciastotî.* În: Trudî LPI, nr.3, 1948.
17. Anisimova, N. D., Ţi-cen, E. *O samoraskacivanii sinhronnih maşin.* În: Izvestia vuzov. Energhetika, nr. 4, 1961.
18. Dolghinov, A, I., Kuan-ţi, Li. *Uproşcennaia metodika rasceota uslovii samovozbujdenia v sistemah s neskolkimi sinhronnimi i asinhronnîmi maşinami.* În: Izvestia vuzov. Elektroenerghetika, nr. 5, 1960.
19. Anisimova, N. D., Ţi-cen, E. *Issledovanie vliania ARV na proţess samoraskacivania sinhronnoi maşinî.* În: Dokladî IV mejvuzovskoi konferenţia po primeneniu fiziceskovo i matematicesskovo modelirovania v razlicinîh oblastiah tehniki, MEI, 1962.
20. Lukaşov, E. S. *Samovozbujdenie i samoraskacivanie sinhronnovo gheneratora v nastroennîh elektroperedaci.* Avtoreferat, Novosibirsk, 1959.
21. Kazovski, E. A. *Perehodnîe proţessî v elektriceskih peremennovo toka.* Moskva, Izd. AN SSSR, 1962.
22. Bulgakov, B. V. *Diskriminantnaia krivaia i oblast aperiodiceskoi ustoicivosti.* În: Prikladnaia matematika i mehanika, T. 24, 1950.
23. Anisimova, N. D., Venikov, V. A., Dolghinov, A. N., Fedorov, D. A. *Samovozbujdenie i samoraskacivanie v elektriceskih sistemah.* În: Elektricestvo, nr. 4, 1963.
24. Adkins, B. *Obşciaia teoria elektriceskih maşin.* Moskva-Leningrad, Gosenergoizdat, 1960.
25. Crary. *Two-Reation Theory of Synchronons Machines.* În: Trans. AIEE, nr. 56, 1937.
26. Butler, L., Concordia, C. *Analyses of series capacitor application problems.* În: Trans. AIEE, nr. 56. 1937.
27. Knudsen, N. *Abnormac Oscillations in Electric Circuits Containig Capacitance.* În: Acta Polytechnica, 1953.
28. Voipio, K. *The influence of magnetic Saturation on transients of synchronons alternators with special reference to large capacitance Coads.* În: Kge tekn, högskolans hande, 1955.
29. Levinştein, M. L. *Iavlenia parametriceskovo rezonansa pri rabote sinhronnoi maşinî na emkostnuiu nagruzku.* În: Trudî LPI, nr. 3, 1948.
30. Kantor, R. M. *Nekotorîe voprosî iz teorii dinamiceskih perenapriajenii v elektriceskih sistemah.* În: Elektricestvo, nr. 5, 1955.

Redactor responsabil : ing. LAURA ROMERT
Tehnoredactor : ELENA GERU

Dat la cules 13.04.1967 Bun de tipar 04.12.1967 Apărut 1967 Tiraj 2000+110 Broşate Hîrtie tipar tip A de 63 g/m², 540×840/16 Coli editoriale 10 Coli de tipar 12 A. 5974/1967 C.Z. pentru bibliotecile mari 621. 316. 72:621.31 C.Z. pentru bibliotecile mici 621

Tiparul executat la Întreprinderea Poligrafică „13 Decembrie 1918", Str. Grigore Alexandrescu 89—97, Republica Socialistă România
C 337

Scanned with OKEN Scanner